

参考資料 1

苫小牧地点における
貯留層総合評価

平成 23 年 10 月 26 日
平成 23 年 12 月一部改訂

本資料は、「CCS 実証試験実施に向けた専門検討会（第1回）」（10月26日）に提出したものを、同検討会における議論を踏まえて、一部表記をわかりやすくしたものです。

内容

第1章 目的・評価手法	1
1.1 目的	1
1.2 貯留層総合評価の評価手法	1
第2章 貯留層総合評価のための調査	1
2.1 調査概要	1
2.2 広域地質	3
2.2.1 地質概要	3
2.2.2 地層水塩分濃度解析による水理地質評価	6
2.3 使用した地質データ	9
2.4 三次元弾性波探査結果の概要	10
2.4.1 実地調査	10
2.4.2 3Dデータの解釈	11
2.5 苫小牧CCS-1掘削結果の概要	17
2.5.1 掘削作業概要	17
2.5.2 地質調査結果	17
2.5.3 リークオフテスト結果	20
2.5.4 VSP結果	20
2.5.5 圧入テスト結果	22
2.6 苫小牧CCS-2調査結果の概要	23
2.6.1 掘削結果	23
2.6.2 地質調査結果	23
2.6.3 リークオフテスト結果	24
2.7 滝ノ上層解析結果	24
2.7.1 貯留層	24
2.7.2 遮蔽層	25
2.7.3 地質モデル構築	26
(1) 岩相分布・性状分布の推定	26
(2) 地質構造モデル構築	28
(3) 属性モデル構築	32
2.7.4 CO ₂ 挙動予測シミュレーション	36
2.7.5 弾性波探査シミュレーション	36

目次-1

2.8 萌別層解析結果.....	38
2.8.1 貯留層.....	38
2.8.2 遮蔽層.....	39
2.8.3 地質モデル構築.....	41
(1) 構造モデル構築.....	41
(2) 属性モデル構築.....	45
2.8.4 CO ₂ 挙動予測シミュレーション.....	46
2.8.5 弾性波探査シミュレーション.....	46
第3章 貯留層総合評価	1
3.1 貯留層の総合評価.....	1
3.1.1 滝ノ上層評価結果.....	1
(1) 貯留層評価.....	1
(2) 遮蔽層評価.....	1
(3) シミュレーション概要.....	2
① 概要.....	2
② パラメータ.....	2
(4) シミュレーションによるCO ₂ の圧入挙動.....	4
① CO ₂ 圧入時の挙動.....	4
② 貯留層圧力分布.....	5
(5) シミュレーションによる貯留CO ₂ の長期挙動予測.....	10
① 圧入に伴う貯留層内のCO ₂ 分布予測.....	10
② CO ₂ の貯留形態ごとの割合.....	17
(6) 総合評価.....	19
① 滝ノ上層評価のまとめ.....	19
② 総合評価.....	19
3.1.2 萌別層評価結果.....	21
(1) 貯留層評価.....	21
(2) 遮蔽層評価.....	21
(3) シミュレーション概要.....	21
① 概要.....	21
② パラメータ.....	22
③ ケーススタディ.....	24

(4) シミュレーションによるCO ₂ の圧入挙動.....	27
① CO ₂ 圧入時の挙動.....	27
② 貯留層の圧力分布.....	29
(5) シミュレーションによる貯留CO ₂ の長期挙動予測.....	33
① 圧入に伴う貯留層内のCO ₂ 分布予測.....	33
② 遮蔽性能検討.....	40
③ CO ₂ の貯留形態ごとの割合.....	45
(6) 総合評価.....	47
① 萌別層評価のまとめ.....	47
② 総合評価.....	47
3.2 貯留対象層周辺を取巻く環境等の評価.....	49
3.2.1 活断層分布および地震活動.....	49
(1) テクトニクス概要.....	49
(2) 北海道周辺の地殻応力分布.....	50
(3) 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動.....	53
(4) 苫小牧周辺の活断層.....	56
(5) 三次元弾性波探査断面図に見られる断層.....	56
(6) 苫小牧地点で予想される地震.....	57
3.2.2 CO ₂ 漏出の可能性検討.....	59
(1) CO ₂ 漏出要因の洗い出し.....	59
(2) CO ₂ 漏出要因に関する検討のまとめ.....	59
3.3 「CCS実証事業の安全な実施にあたって」への対応.....	61

第1章 目的・評価手法

1.1 目的

CCS大規模実証試験を安全に実施するためには、弾性波探査や調査井の掘削等により地層の状態を詳細に把握し、CO₂を貯留する貯留層としての適正性及びCO₂を長期間にわたり貯留層から漏洩させない遮蔽層としての適正性を確認する必要がある。

苫小牧地点については、平成23年度上半期に必要な調査・分析が終了したことから、貯留層総合評価として取りまとめを行った。

本貯留層総合評価は、CCS大規模実証試験を安全に実施することが可能であるかを判断するために、苫小牧地点の貯留層と遮蔽層の適正性について評価を行ったものである。

1.2 貯留層総合評価の評価手法

経済産業省は、平成21年8月に我が国がCCSの大規模実証試験を実施する場合に、安全面・環境面から遵守することが望ましい事項について基準を示すものとして「CCS実証事業の安全な実施にあたって」を策定している。

この報告書は、大規模実証試験を行うに際して、地質面から検討すべき事項から設備の安全確保、CO₂輸送面からの安全確保、運用時の安全確保、モニタリング、坑井の廃坑に至るまで、CCSの実施に係る全般について検討したものとなっている。

本貯留層総合評価では、本報告書の項目1.「CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項」に沿って評価を実施した。

具体的には、必要な地質データを取得するために苫小牧地点において以下の調査を行った。

- ・「三次元弾性波探査（2009）」の実施
- ・「三次元弾性波探査（2010）」の実施
- ・調査井「苫小牧CCS-1」の掘削
- ・調査井「苫小牧CCS-2」の掘削

その上で、既存の地質データおよびこれらの調査から得られた地質データを使用し、「CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項」について、より具体的な内容の検討・評価を行った。

第2章 貯留層総合評価のための調査

2.1 調査概要

調査対象区域の苫小牧港西港区沿岸海域は、これまで石油・天然ガスの探査を目的とした弾性波探査による調査が多くなされており、周辺には深度 3,000m を越える天然ガス開発用の坑井が複数あることから、CO₂貯留対象となり得る帯水層として、海底面下約 1,000m ～約 3,000m に萌別層砂岩層および滝ノ上層 T 1 部層が存在することが知られていた。

萌別層砂岩層および滝ノ上層 T 1 部層を貯留対象層として CCS 大規模実証試験を実施するために、既存の地質データに加えて貯留対象地域における詳細な地質データを取得して地下の構造形態を詳細に把握した。これらのデータから地質モデルを構築し、そのモデルを用いたシミュレーションにて CO₂ の貯留可能性や長期的な移動について評価することを目的として、平成 21 年度から平成 23 年度において、以下の調査を実施した(図 2.1-1 に調査範囲位置図を示す)。

1) 三次元弾性波探査

苫小牧港西港区沖合において、平成 21 年度には東西約 3.8km、南北約 4.1km の範囲で、平成 22 年度には東西約 5.9km、南北約 7.6km の範囲で三次元弾性波探査のデータ取得した。

2) 調査井

平成 22 年度には苫小牧 CCS-1 を掘削し、物理検層、リークオフテスト(遮蔽層の強度測定)、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層の圧入テスト、垂直弾性波プロファイリング(VSP)調査等を実施した。採取したコア試料およびカッティングス試料の分析(孔隙率、浸透率、スレショルド圧力試験等)は、平成 22 年度および平成 23 年度に実施した。

平成 23 年度には苫小牧 CCS-2 を掘削し、リークオフテストおよびコア試料の採取・分析(孔隙率、浸透率、スレショルド圧力試験等)を実施した。

3) 地質モデル構築および CO₂挙動予測シミュレーション

平成 22 年度には、周辺の既存坑井データと二次元弾性波データ、および平成 21 年度実施の三次元弾性波探査の結果に基づいて滝ノ上層 T 1 部層を圧入対象層とした地質モデル構築と CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。

平成 23 年度には平成 22 年度の弾性波探査の結果と、平成 22 年度から平成 23 年度に得られた苫小牧 CCS-1 および苫小牧 CCS-2 での試験結果と試料分析の結果を加えて、滝ノ上層 T 1 部層と萌別層砂岩層を圧入対象とした地質モデ

ルを構築し、CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。

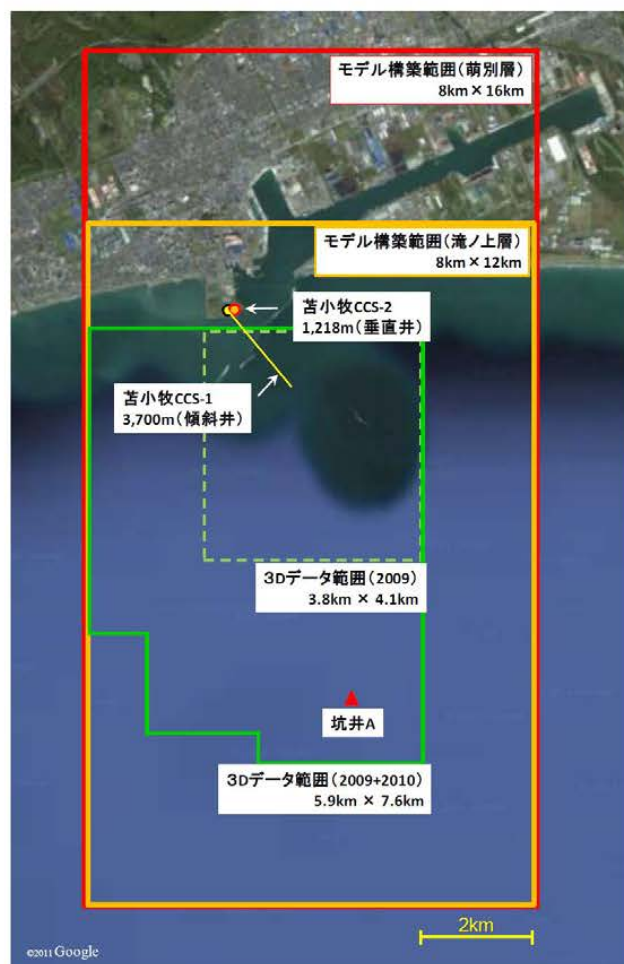


図 2.1-1 調査範囲位置図

2.2 広域地質

2.2.1 地質概要

調査区域および周辺地域では、これまで国による基礎物理探査、民間企業による石油・天然ガスを対象とした探鉱活動により、地下の地質層序および地質構造が明らかになっている。

調査区域は、苫小牧リッジと呼ばれる中生代火山岩類の基盤岩の隆起帯に位置しており、基盤の上位の古第三紀以降の様々な構造場のもとで形成された堆積盆に、古第三系、新第三系および第四系が認められる（図 2.2-1）。調査区域では、古第三系の上位に、下位より滝ノ上層、振老層、平取+軽舞層、荷葉層、萌別層、鶴川層などの地層が堆積しており、滝ノ上層から荷葉層にかけては新第三系、萌別層と鶴川層は第四系に区分されている（図 2.2-2）。

調査区域から東方に向けては、波長が 10km 程度の褶曲構造が南北ないし北北西-南南東方向に並列して複数認められ、一般に東側の背斜構造群は逆断層を伴った変形を受けているが、調査区域を含めて西側の背斜構造群はいずれも比較的弱い変形と考えられている。

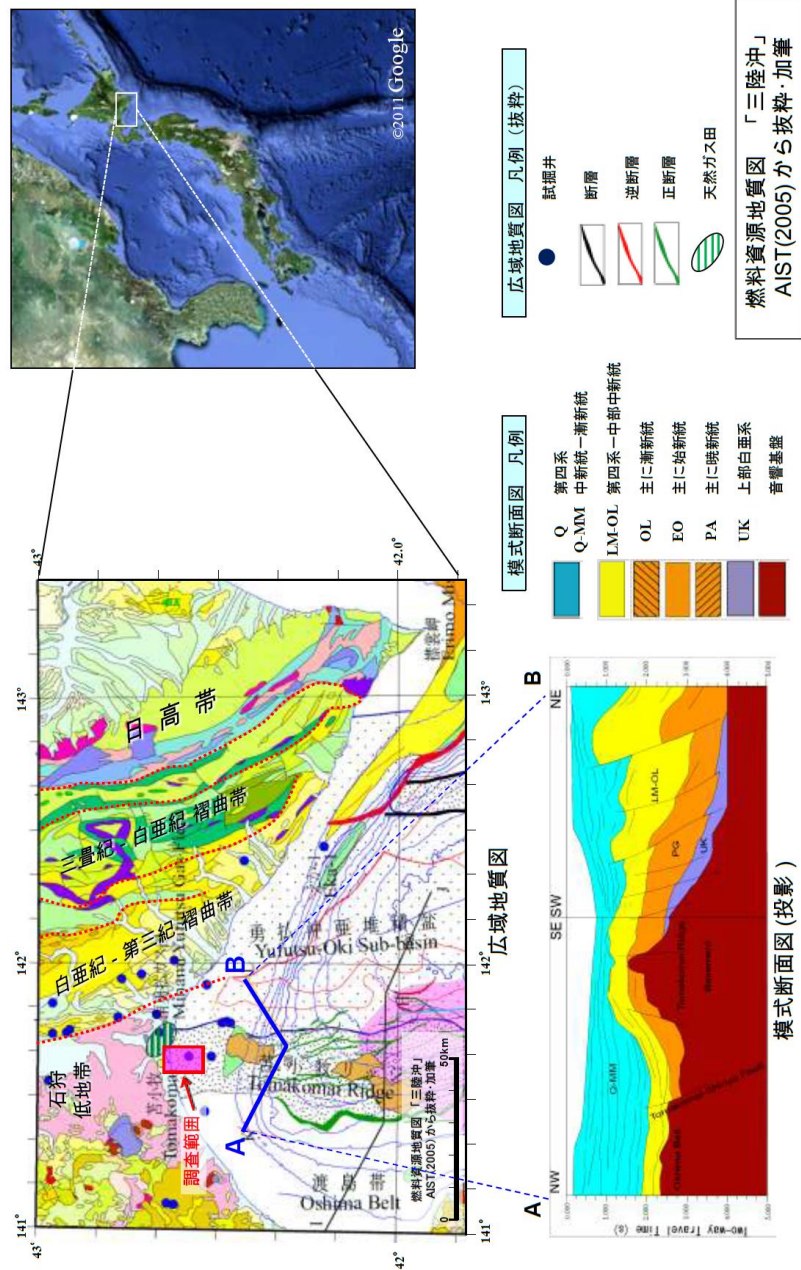


図 2.2-1 苦小牧周辺の広域地質図と模式断面図

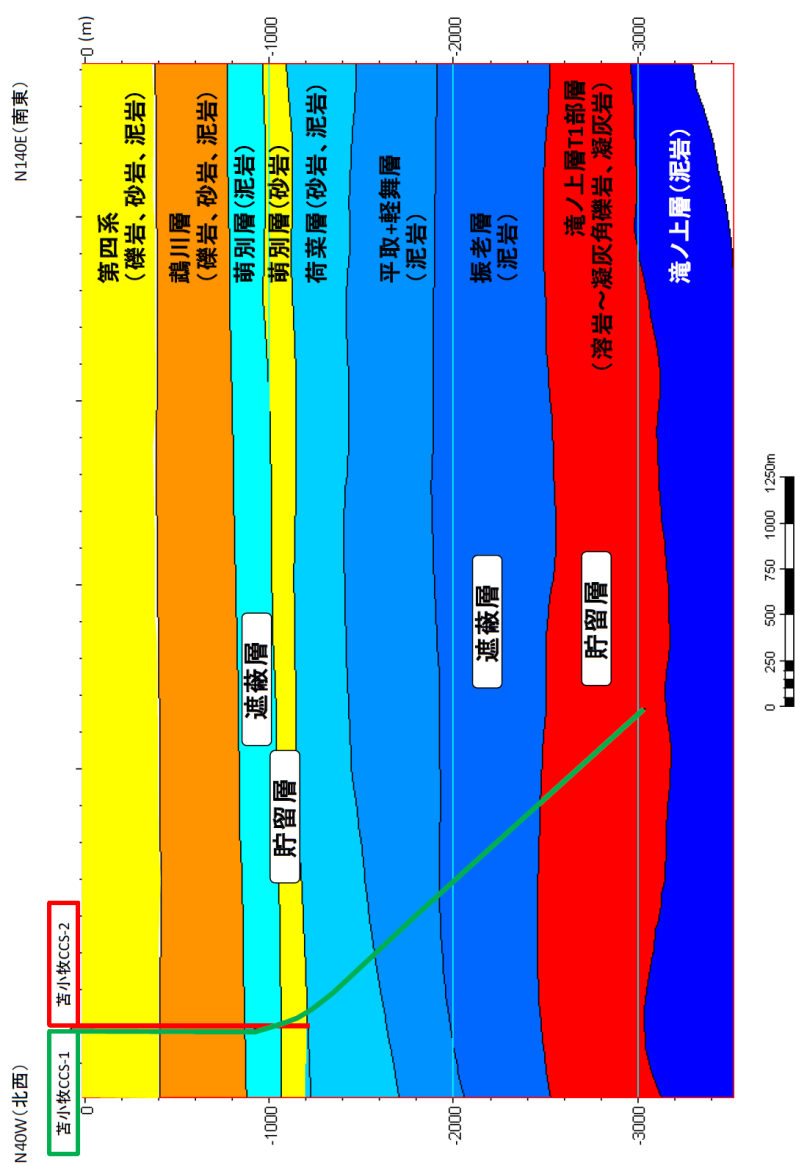


图 2.2-2 苦小牧地点の層序

2-5

2.2.2 地層水塩分濃度解析による水理地質評価

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」においては、「CO₂貯留層、キャップロックおよびその上部の領域を含む水理地質および地質構造を広域モデル（概念モデル）として既存資料等を利用して構築する」と記載されている。そこで、複数の周辺坑井における物理検層データおよび地層温度データを使用し、滝ノ上層以浅の地層水の塩分濃度を算出し、坑井ごとに深度分布を求め、地質層序と塩分濃度の対応関係を評価した（図 2.2-3）。

1) 萌別層～荷菜層

表層から萌別層上部へは、下位に向かって数 100～1,000ppm の範囲で次第に塩分濃度が上昇し、萌別層下部～荷菜層では数 1,000～10,000ppm の範囲で安定した値となり、検討範囲全体にわたって同様の傾向を示し、成層構造をなすことがわかった。鵜川層～萌別層上部の塩分濃度と萌別層下部～荷菜層のそれとは明らかに異なり、成層構造をなすことから、鵜川層と萌別層下部～荷菜層との間には垂直方向への地層水の移動はないと考えられる。

2) 滝ノ上層

滝ノ上層の塩分濃度は数 1,000～数 10,000ppm を示し、その上位層の数 1,000～10,000ppm の塩分濃度よりも高く、上位層同様に検討範囲にわたって成層構造をなすことがわかった。

また、滝ノ上層とその上位層の地層圧力を比較するために、苫小牧CCS-1（後述）の掘削時における泥水比重を対深度でプロットすると、上位層では比重 1.1 前後であるのに対し、滝ノ上層では比重 1.4～1.5 である。滝ノ上層とその上位層との泥水比重が異なるということは、滝ノ上層の地層圧力がその上位層とは異なっていることを示す。すなわち、滝ノ上層とその上位層とで圧力システムが異なり（図 2.2-4）、垂直方向の圧力伝播がなく、地層水の移動がないと考えられる。

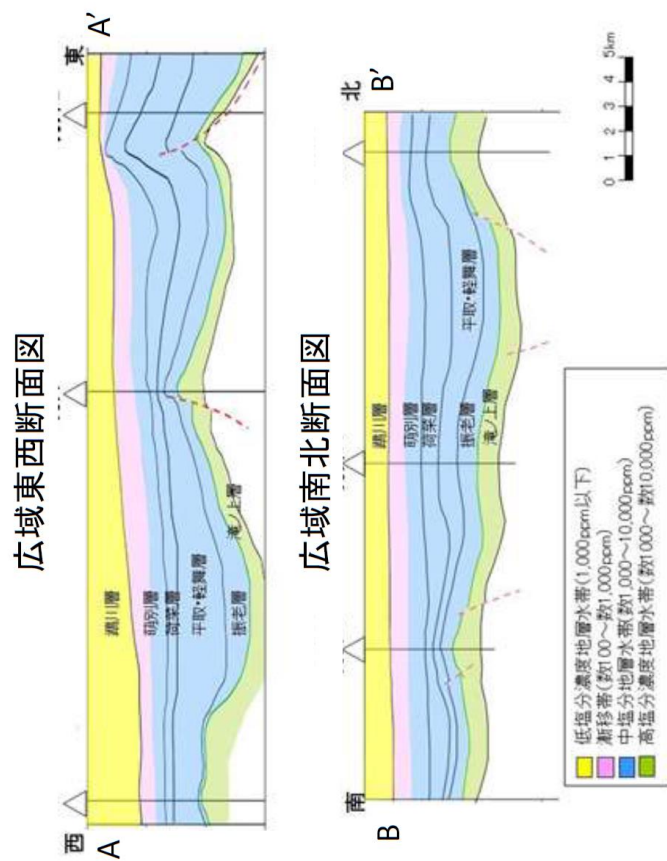


図 2.2-3 地層水の塩分濃度分布断面図

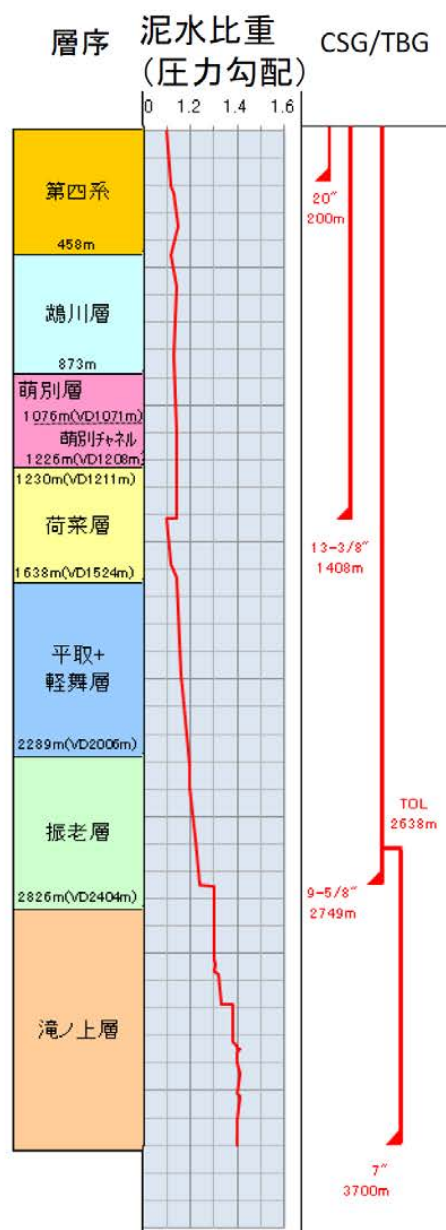


図 2.2-4 苫小牧 CCS-1 における泥水比重の変化図

2.3 使用した地質データ

苫小牧地点周辺を含む道央南部の陸域および海域では、数十年にわたって石油・天然ガスのための調査が国および民間企業によって行われてきた。苫小牧地点における貯留層評価に使用した地質データには、国による基礎物理探査データ、民間企業が取得した既存の二次元弾性波探査データ（以下、「2Dデータ」という）や周辺坑井データなどが含まれる。

貯留層の評価には、既存地質データおよび今回新規に取得した地質データを使用した（表 2.3-1）。今回取得した三次元弾性波探査データ（以下、「3Dデータ」という）の解析においては、その範囲内にある既存の坑井A（1970年代に民間企業によって海域に掘削された試掘井で、深度3,000m以上の滝ノ上層以深まで調査されている）および苫小牧CCS-1のデータをリファレンスとして使用した。また、滝ノ上層T1部層の地質モデルを構築する際に使用した浸透率・孔隙率相関には既存の坑井Aおよび周辺坑井のデータを使用した。

表 2.3-1 貯留層評価の使用データ一覧

使用データ	使用方法	データソース
三次元弾性波探査データ (3D)	地質構造解釈、堆積学的検討、音響インピーダンス等の物性値推定	3Dデータ (リファレンスデータ: 坑井A・苫小牧CCS-1)
コア分析データ	岩石学的評価の他、孔隙率、浸透率、相対浸透率、毛細管圧、スレシヨルド圧等の基礎物性値の提供 浸透率-孔隙率相関	周辺坑井 坑井A 苫小牧CCS-1 苫小牧CCS-2
坑井速度測定データ	弾性波データの時間-深度変換	坑井A 苫小牧CCS-1
物理検層データ	岩相区分の判定 インピーダンス推定 岩相分布・孔隙率分布の作成	坑井A 苫小牧CCS-1
温度・圧力データ	地温勾配 坑底圧力(貯留層圧力&地層破壊圧力)決定	坑井A 苫小牧CCS-1 苫小牧CCS-2
二次元弾性波探査データ (2D)	地質構造解釈、堆積学的検討、音響インピーダンス等の物性値推定	陸海域の既存2Dデータ

2.4 三次元弾性波探査結果の概要

2.4.1 実地調査

苫小牧港西港区沖合の海域において、2009年10月8日から11月27日に東西約3.8km、南北約4.1kmの区域で、さらに2010年7月15日から9月10日に東西約5.9km、南北約7.6kmの区域で、3Dデータを取得し、データ解析を行うために両3Dデータを統合した処理を行った（図2.4-1）。

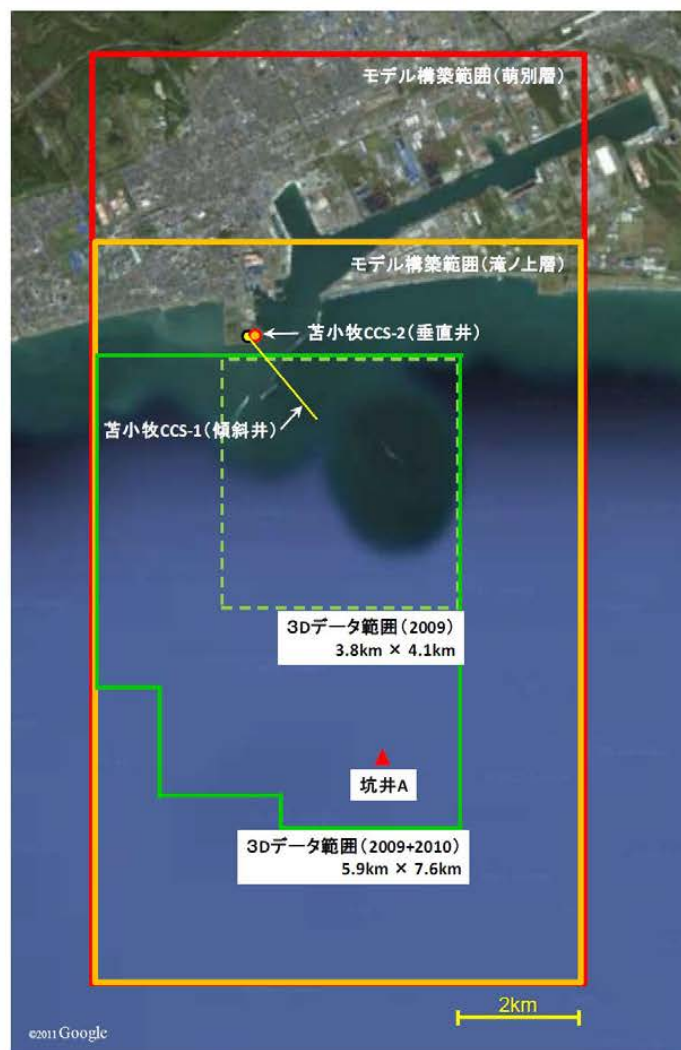


図 2.4-1 調査範囲位置図

2.4.2 3Dデータの解釈

平成22年度および23年度の3Dデータに加え、民間企業が所有する周辺海域の弾性波探査断面と坑井資料を補助的に利用し、層序のコントロールポイントとして坑井Aおよび苦小牧CCS-1を使用して解析作業を実施した。

坑井Aおよび苦小牧CCS-1の層序に従って、下位より「滝ノ上層泥岩層」「滝ノ上層T1部層下部」「滝ノ上層T1部層上部」「振老層」「平取+軽舞層」「荷葉層」「萌別層」「鵠川層」の計8層準に区分し、3Dデータにより各層準について岩相と反射波の特徴、各地層境界や地層内における不整合、オンラップ、ダウンラップなどの堆積様式を確認した。

1) 滝ノ上層

滝ノ上層は火山岩/凝灰岩からなる上部の滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなり、さらに滝ノ上層T1部層は上部の凝灰岩卓越層と下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層とに分けられる。滝ノ上層T1部層は周辺の既存坑井において、浸透率の高い溶岩～凝灰角礫岩・凝灰岩として認められ、その上位には平取+軽舞層、振老層からなる厚い遮蔽層が確認されている。

3Dデータでは滝ノ上層T1部層下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層は全体的に強反射で水平方向の連続性が良く、溶岩～凝灰角礫岩の粗粒堆積物が比較的安定して分布していると推定される(図2.4-2および図2.4-3)。滝ノ上層T1部層上限(振老層基底)は、北北西～南南東の構造の高まり(背斜構造)を示し、その北端部(沖合約3km)付近でドーム状の構造を形成している。この構造は火山の噴出口近傍を示している可能性があり、周辺には孔隙率および浸透率が高い粗粒堆積物が堆積していることが期待される。滝ノ上層T1部層上限は、構造東翼部では約15°で北東に傾斜している(図2.4-4)。

2) 萌別層

萌別層は3Dデータでは上部と下部とで反射波の特徴が異なっている。上部は連続性の悪い弱反射となっていることから、シルト岩～泥岩が発達していると予想され、下部は連続性の良い強反射であることから、坑井Aで認められた礫岩、砂岩のような粗粒堆積物(粗粒相)の発達が予想される。この強反射は南西方向へ薄化して不明瞭になることから、粗粒相は検討海域の北東部を中心に発達していると考えられる。海底面から萌別層までの間では反射波はほぼ平行で、一連の堆積層として識別される(図2.4-2および図2.4-3)。粗粒相発達域(萌別層下部)の上面は、北西から西に約1～3°で緩く傾斜している(図2.4-5)。

3) 地質構造

調査対象区域の地質構造は、滝ノ上層T1部層上限（振老層基底）構造図では北北西方向に延びた背斜構造となっている（図2.4-4）。3Dデータから、滝ノ上層上限の背斜構造に沿って北北東-南南西に延び、荷菜層にまで達する断層が存在すると解釈した。断層の落差は一樣ではなく、検討海域の中央付近では若干の落差が認められるが、北部や南部では落差は認められない。背斜頂部付近での削剥様式は振老層基底、平取+軽舞層基底および荷菜層中の傾斜不整合で認められ、振老層堆積前から荷菜層堆積時にかけて断層の活動と背斜構造の形成が断続的に繰り返されたと解釈した。また、萌別層基底にも背斜頂部から東部にかけて傾斜不整合が認められることから、断層の活動は萌別層堆積前まで続いていた可能性がある。

一方、萌別層から第四系にかけては一連の堆積層として認識されること、鵲川層上限の時間構造図では苫小牧沖構造の背斜構造が認められないことおよび鵲川層基底の時間構造図では東の高まりからの構造の張り出しとなっていることから、萌別層堆積時以降は背斜構造を形成するような構造運動はなかったと考えられる（図2.4-5）。

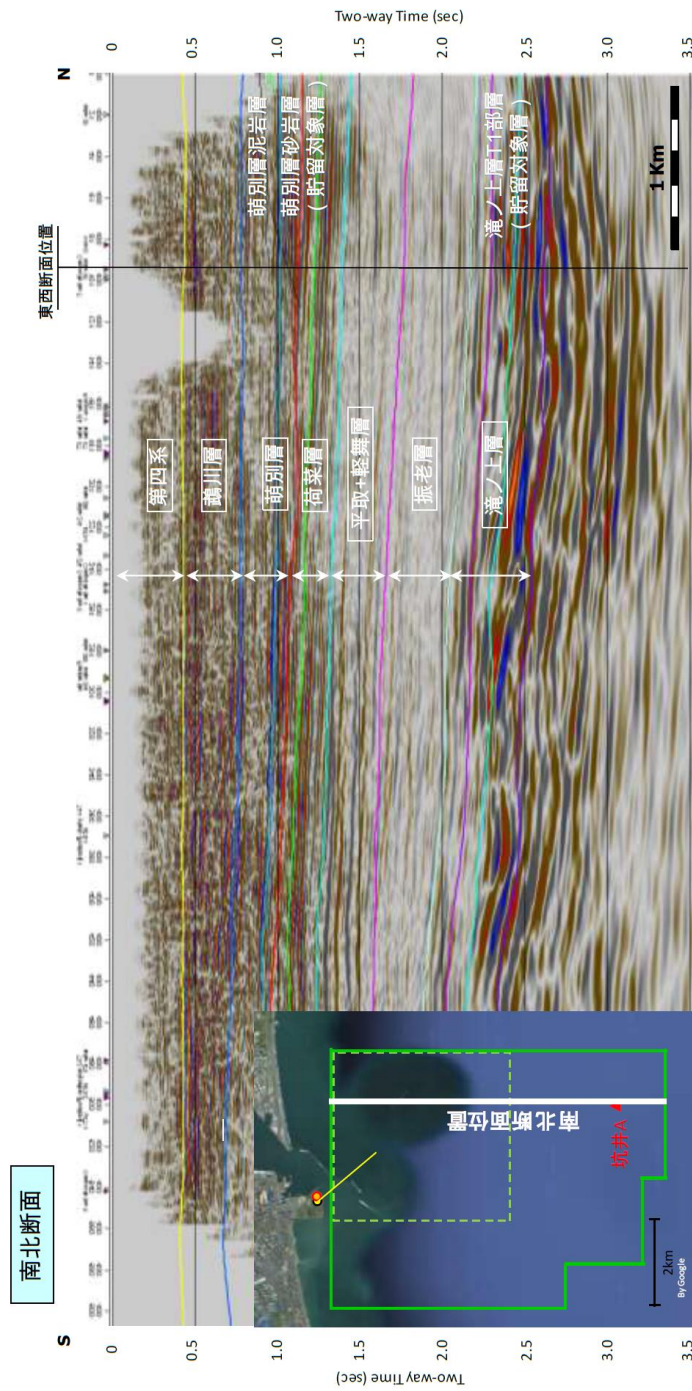


図 2.4-2 三次元弾性波探査結果解釈断面図 (南北断面)

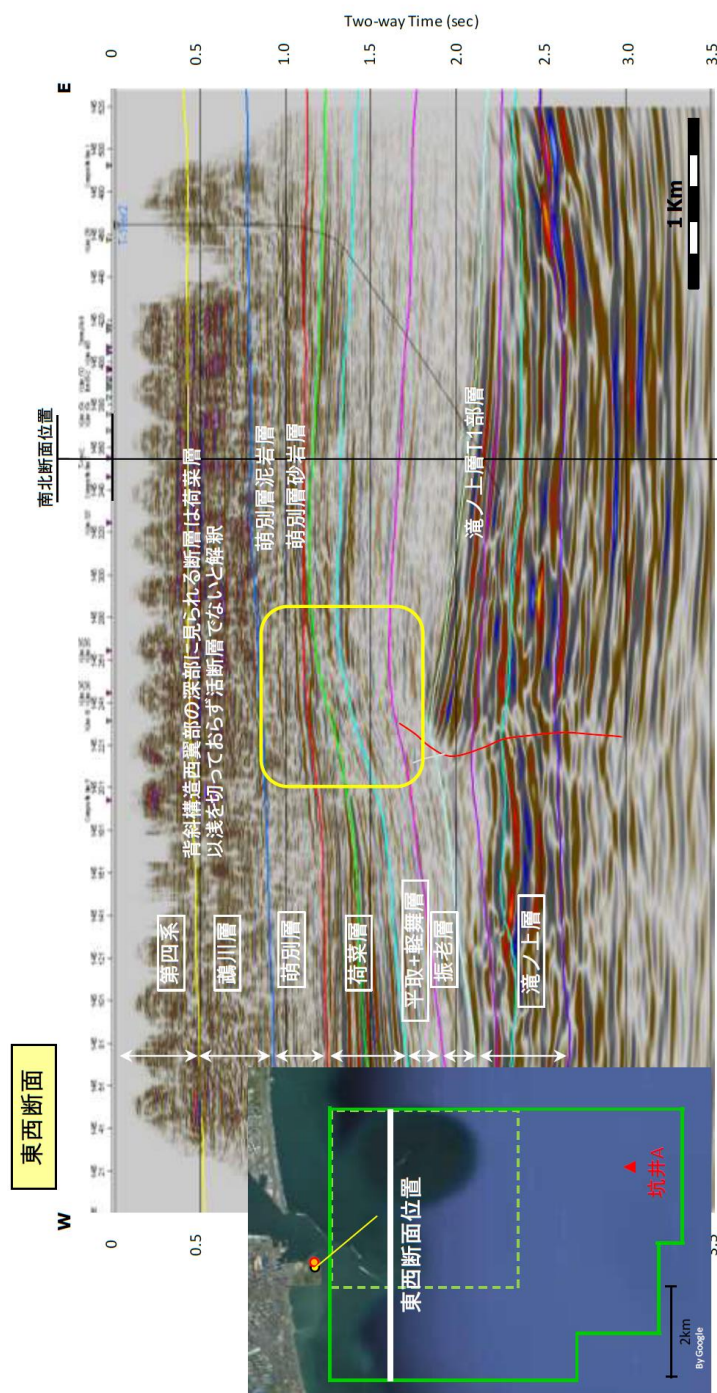


図 2.4-3 三次元弾性波探査結果解釈断面図（東西断面）

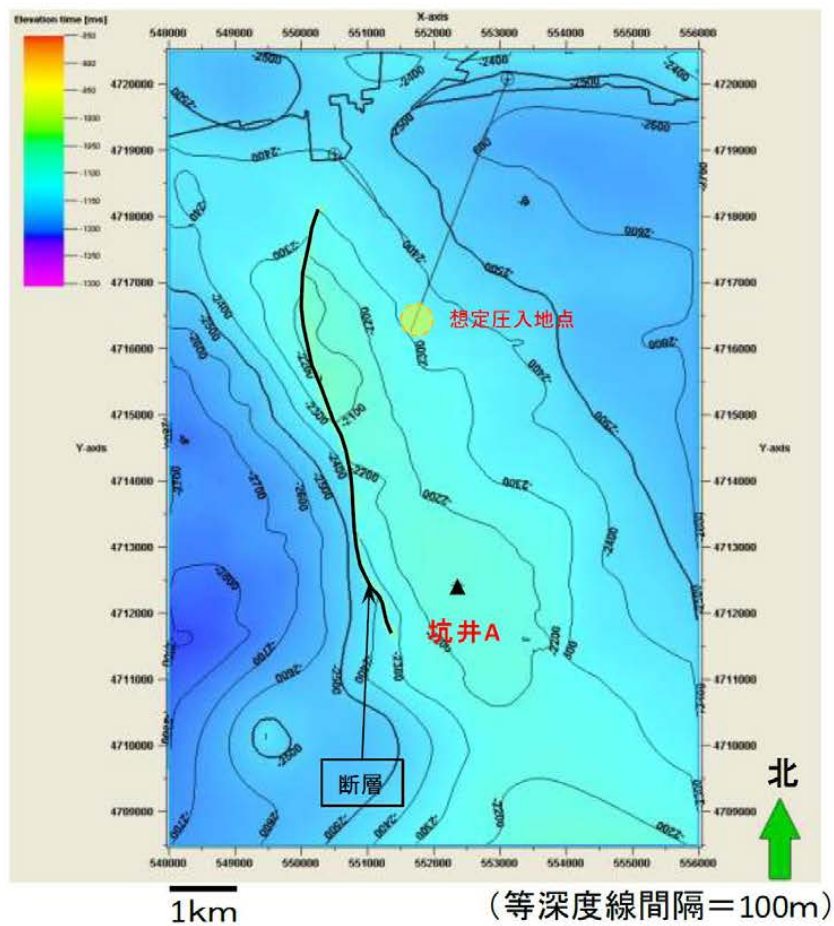


図 2. 4-4 滝ノ上層T1部層上限構造図
(図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標)

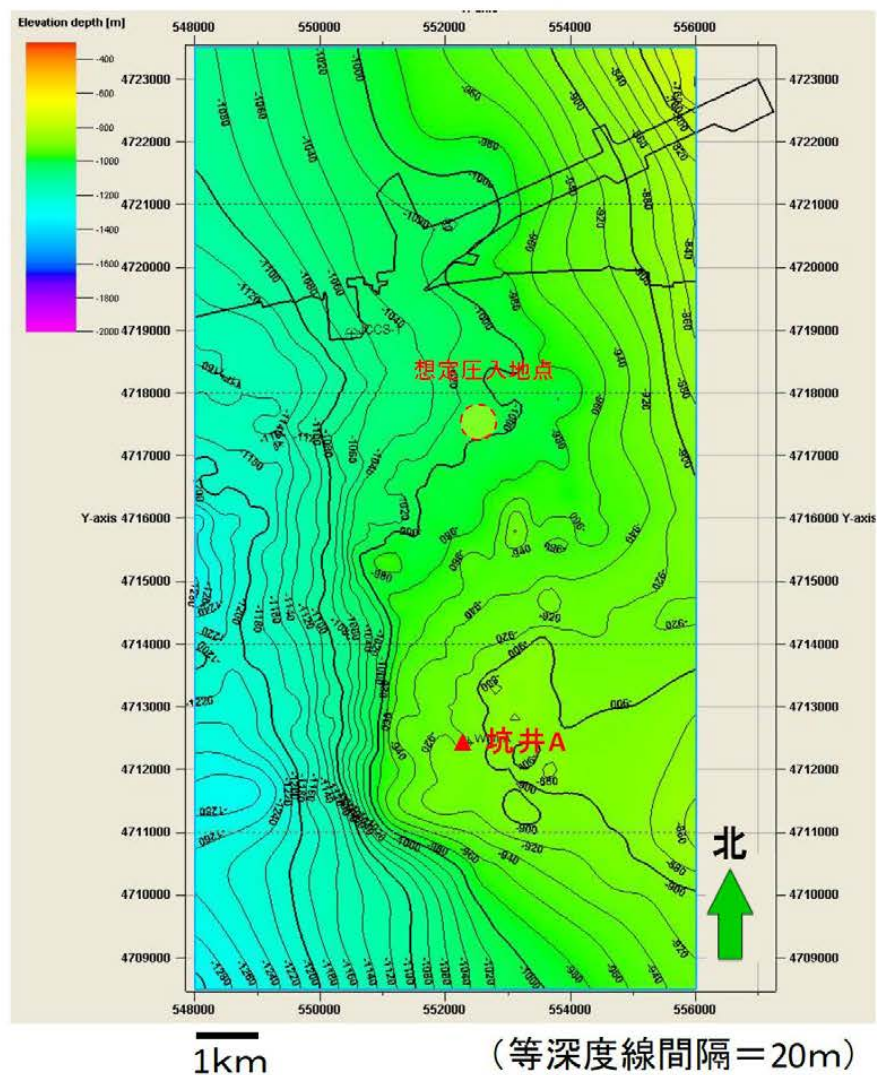


図 2. 4-5 萌別層砂岩層上限構造図
(図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標)

2.5 苫小牧CCS-1掘削結果の概要

2.5.1 掘削作業概要

2010年11月5日から2011年2月21日までの109日間において、深度3,700m（垂直深度3,046m）の傾斜井を掘削した（図2.4-1）。

2.5.2 地質調査結果

掘削中は、カッティングス調査および物理検層により、層序および岩相を確認した。その結果を表2.5-1に記す。なお、萌別層砂岩層の上限は1,076m（垂直深度1,071m）である。

表 2.5-1 地質層序と岩相

地層名	掘削深度 mMD (垂直深度 mVD)	岩 相
第四系	0 - 458	未固結砂礫等
鶴川層	458 - 873	砂礫岩を主体とし、シルト岩を伴う
萌別層	873 - 1,230 (1,211)	上部はシルト岩～泥岩主体とし、下部は砂岩からなる。
荷菜層	1,230 - 1,638 (1,211) - (1,524)	シルト岩～砂岩を主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。
平取+軽舞層	1,638 - 2,289 (1,524) - (2,006)	シルト岩～砂岩主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。
振老層	2,289 - 2,826 (2,006) - (2,404)	シルト岩～砂岩を主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。
滝ノ上層 T1部層	2,826 - 3,700 (2,404) - (3,046)	火山角礫岩・凝灰岩等の火山岩再堆積相を主体とし、一部に枕状溶岩を確認した。

各坑径掘り止め時に以下の種目の物理検層を実施し、岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は、坑径、比抵抗、自然電位、ガンマ線、見かけ密度、中性子孔隙率、音波速度、比抵抗画像、ディップメータ、核磁気共鳴である。図2.5-1に物理検層結果の事例を記す。

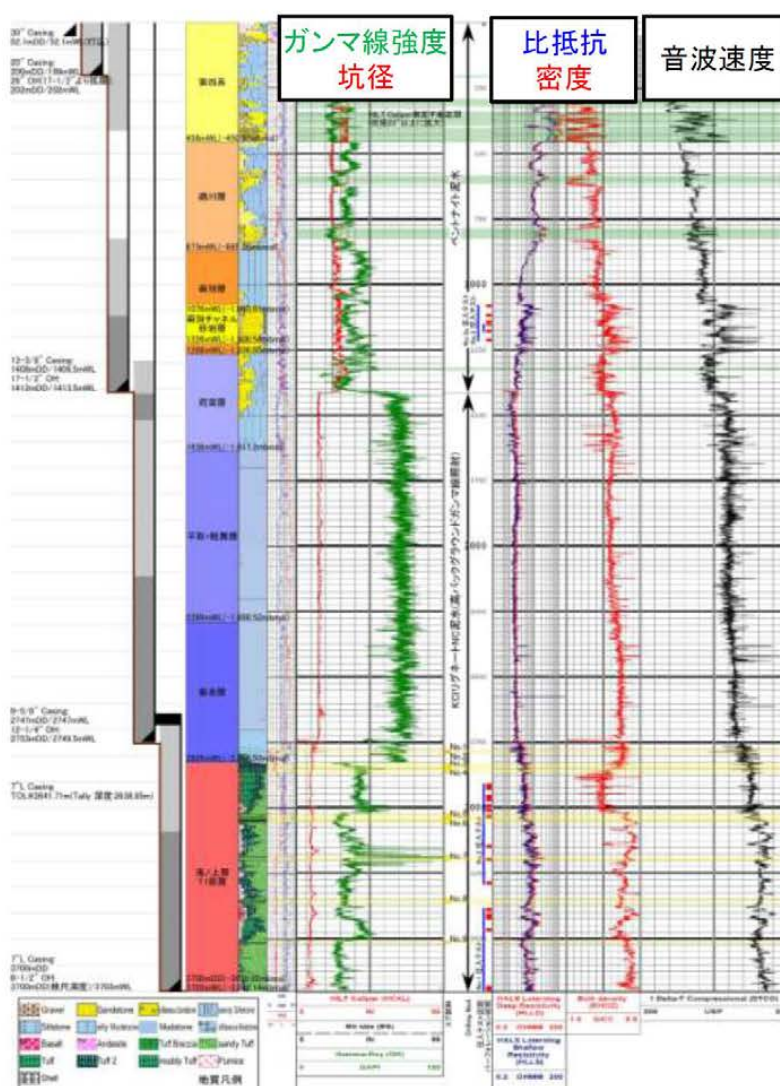


圖 2.5-1 苦小牧 CCS-1 物理檢層結果事例

物理検層作業で測定された温度のビルドアップ解析結果と取水井の揚水試験時に測定した温度から地温勾配を求めた(図 2.5-2)。第 1 次および第 2 次物理検層作業区間のビルドアップ温度が地温勾配より高く出ているのは、どちらも 17-1/2" (インチ) の

大坑径環境下で高粘度のペントナイト泥水を使用したため、検層作業中に掘削泥水の除熱が間に合わなかったためである。図中には、温度勾配の傾向を示すため、FMI・XPT・CMR・RCBLの測定温度もプロットした。

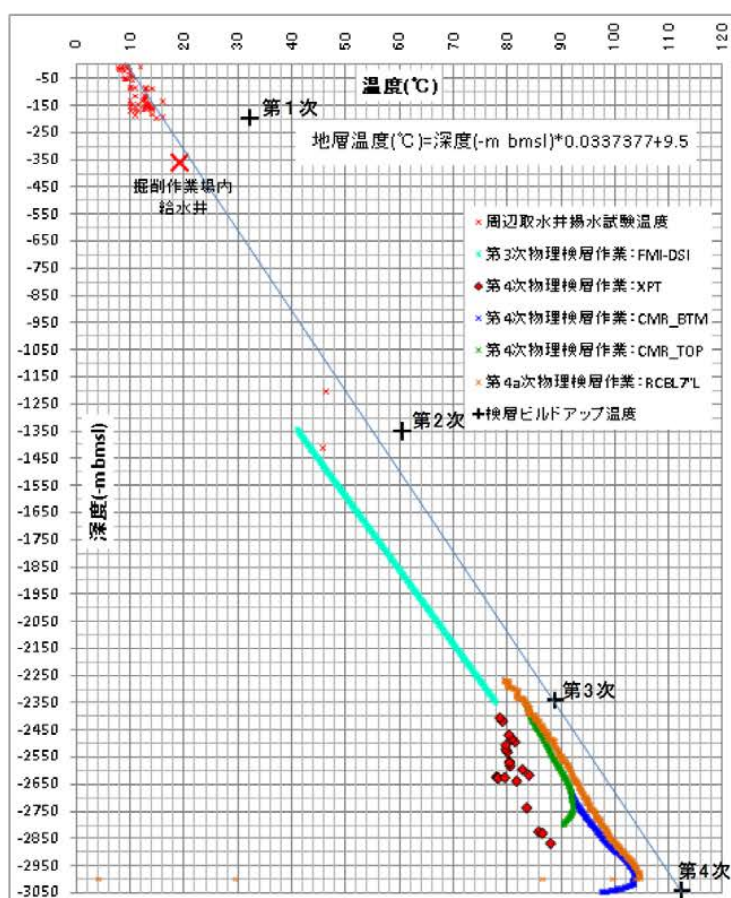


図 2.5-2 苫小牧 CCS-1 地温勾配解析結果

カッティングス試料を地表～深度 3,700m の間、分析項目により 20m～50m ごとに採取し、コア試料（直径約 10cm）を振老層泥岩で 2 回（合計 16m）、滝ノ上層 T1 部層で 7 回（合計 115.9m）採取した。

これらの試料に関し、微化石分析（有孔虫および珪藻化石分析）、岩石鉱物分析（X線分析および薄片鑑定）および岩石物性分析（孔隙率、浸透率、スレシヨルド圧力分析など）を実施した。

有孔虫および珪藻化石分析により各地層の堆積時代を推定するとともに、周辺にある

既存坑井と対比することで地層名を確認した。有孔虫化石分析により堆積環境を推定し、振老層は中部半深海（500～1000m）、萌別層は中部半深海上部から上部半深海（200～500m）であることがわかった。

コア試料を用いた岩石物性分析により以下を確認した。

1) 滝ノ上層 T1 部層

- ・孔隙率：5～18%（封圧下）
- ・空気浸透率：0.001～0.01mD（封圧下）

2) 振老層泥岩層

- ・孔隙率：12.4～18.0%（封圧下）
- ・水浸透率： 8.2×10^{-6} ～ 36.7×10^{-6} md
- ・スレシヨルド圧力
 - 孔径分布からの推定（N₂-水系）：5.73～15.02MPa
 - 段階昇圧法（N₂-水系）：水浸透率が低く長期間を要するため実施せず。
 - 残差圧力法（N₂-水系）：1.29～12.3MPa 以上^{注)}（4 試料）
 - 段階昇圧法（CO₂-水系）：11.72MPa 以上^{注)}（2 試料）

注) プレークスルーしなかったことからこの値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断した。

2.5.3 リークオフテスト結果

苫小牧 CCS-1 の深度 2,753～2,758m（垂直深度 2,350.1～2,354.8m）の振老層下部において、遮蔽層強度を測定することを目的として、リークオフテストおよびエクステンディッド・リークオフテストを実施した。その結果、加圧対象の中央深度 2,755.5m（垂直深度 2,352.0m）におけるリークオフ圧力は 45.3MPa であり、等価泥水比重で 1.96 であること、また閉合圧力が 44.55MPa、等価泥水比重で 1.93 であることがわかった。

2.5.4 VSP 結果

苫小牧 CCS-1 において、300～800m の間は 100m 間隔で、深度 850～3,265m は 25m 間隔で VSP 調査を実施することにより、深度-走時関係を取得するとともに、坑井近傍における弾性波データを取得したことから、苫小牧 CCS-1 と 3D データとの高精度な対比が可能となった（図 2.5-3）。

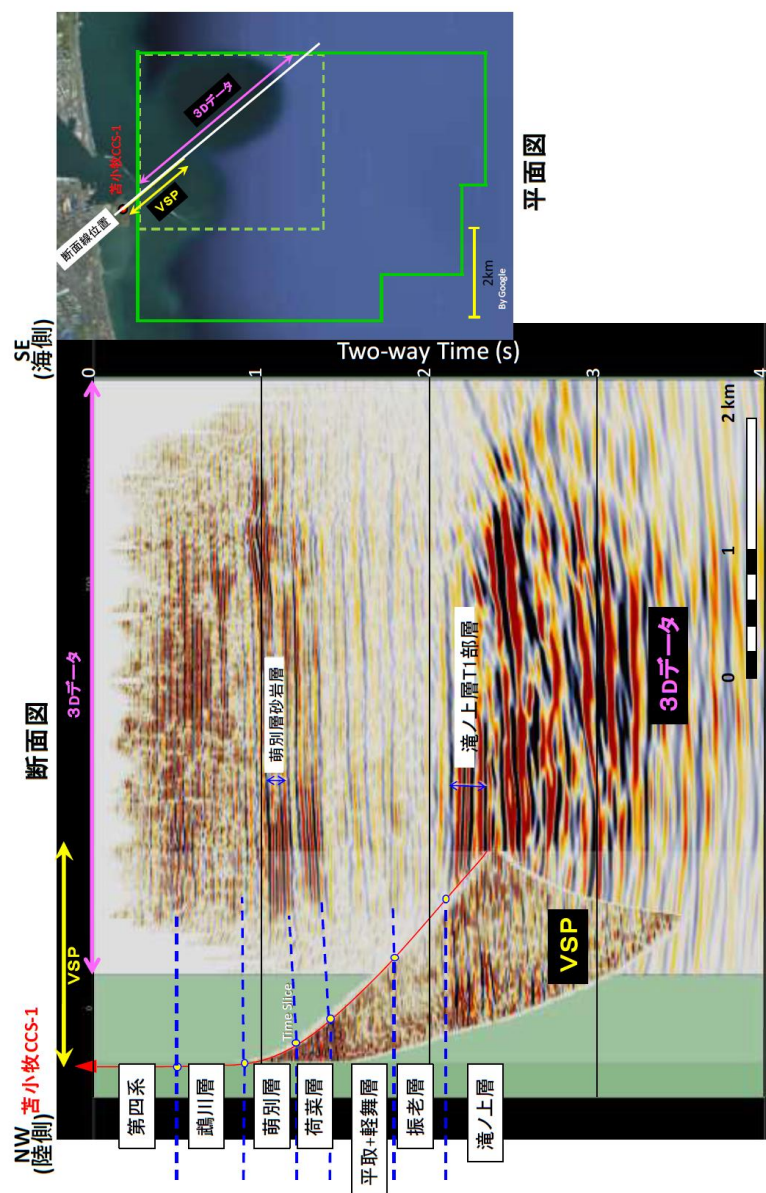


図 2.5-3 坑跡に沿う三次元断面図およびVSPイメージング断面図の対比（縦軸は往復走時）

2.5.5 圧入テスト結果

圧入テストは、 CO_2 の圧入性および貯留層評価に必要なパラメーター（圧入指数、浸透率）の把握を目的として、苫小牧CCS-1においては滝ノ上層T1部層で2回（No.1圧入テストおよびNo.2圧入テスト）、萌別層砂岩層で2回（No.3圧入テストおよびNo.3a圧入テスト）の水圧入テストを行った。

1) 滝ノ上層T1部層

7) No.1圧入テスト（対象区間：掘削深度3,382～3,698mの区間内で66m分）

- ・産出能力テストおよび圧入能力テストを実施したが、産出が見られず、圧入も不可能であった。
- ・上記結果および産出・圧入後の坑底圧力の解析結果から、本坑井周辺では低浸透性でほとんど圧入性は無いと判断された。

4) No.2圧入テスト（対象区間：掘削深度2,907～3,289mの区間内で120m分）：

- ・産出能力テストでは最大レート約400kl/日での産出を確認した。累計産出量は157.4klであった。地層水は泥水の影響を受けており、圧入井掘削時に地層水を採取する必要がある。
- ・圧入能力テストでは最大650kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は129.5klであった。
- ・産出・圧入後の坑底圧力の解析結果から、本坑井周辺での貯留層の浸透率は0.68～1.18mD程度であると推測された。また、坑井近傍の浸透率が改善していることを確認した。
- ・2.7.3項で述べる3Dデータを使用した岩相分布・性状分布の推定結果と比較すると、苫小牧CCS-1付近には高浸透性の岩相は存在しない可能性が高いという結果を得ている（苫小牧CCS-1の近傍は、図2.7-2における橙色の部分に当たっているが、図2.7-3における低A I（青色）の部分には当たっていない）。

2) 萌別層砂岩層

7) No.3圧入テスト（対象区間：掘削深度1,150～1,182mの区間内で17.5m分）

- ・産出能力テストは、自噴しないことから実施しなかった。地層水は圧入井掘削時に採取する必要がある。
- ・圧入能力テストでは最大300kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は97.7klであった。

- ・圧入後の坑底圧力の解析結果から、貯留層の浸透率は 25mD 程度であると推測した。

イ) No. 3a 圧入テスト (対象区間:掘削深度 1,077～1,217m の区間で 57.5m 分^{注)})

- ・圧入能力テストでは最大 1,200kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は 248.5kl であった。
- ・圧入後の坑底圧力の解析結果から、貯留層の浸透率は 9mD 程度であると推測した。

注) No. 3a 圧入テストの対象区間は、No3 圧入テスト対象区間に 40m 分の区間を加えて実施した。

2.6 苫小牧 CCS-2 調査結果の概要

2.6.1 掘削結果

2011 年 5 月 4 日から 6 月 15 日までの 43 日間で、苫小牧 CCS-1 の北東 37 m の位置において深度 1,218 m まで掘削した。調査終了後は、耐 CO₂ セメントを用いて埋め立てた (廃坑作業を実施した)。

2.6.2 地質調査結果

苫小牧 CCS-2 の深度 993～1,218m の萌別層泥岩層および砂岩層において、直径 8cm のコア試料を連続採取した。掘削後は、苫小牧 CCS-1 との比較を目的として物理検層を実施した。

コア試料を用いて岩石物性分析により以下を確認した。

1) 萌別層砂岩層

- ・孔隙率: 25～40% (封圧下)
- ・空気浸透率: 1～1,000mD (封圧下)
- ・不動水飽和率: 27～75% (平均 51.5%、遠心分離法、1.6MPa 相当)

2) 萌別層泥岩層

- ・孔隙率: 32.4～37.2% (封圧下)
- ・水浸透率: $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3}$ mD
- ・スレシヨルド圧力
 - 孔径分布からの推定: 0.14～1.56MPa
 - 段階昇圧法 (CO₂-水系): 0.75～1.67MPa

2.6.3 リークオフテスト結果

深度 989～993m の萌別層泥岩層下部において、遮蔽層強度を測定することを目的としてリークオフテストを実施した。その結果、テスト区間の中央深度 991m におけるリークオフ圧力は 14.6MPa であり、等価泥水比重 1.50 であることがわかった。

2.7 滝ノ上層解析結果

2.7.1 貯留層

滝ノ上層は火山性碎屑物を含む火山岩層であり、火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層 T1 部層とその下部の泥岩層からなる。滝ノ上層 T1 部層（層厚が約 600m）は、さらに下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層と上部の凝灰岩卓越層とに分けられる。

図 2.7-1 は、調査地点周辺の既存坑井の滝ノ上層 T1 部層における溶岩～凝灰角礫岩および凝灰岩の孔隙率と浸透率の関係をプロットしたものである。本層では、溶岩～凝灰角礫岩相では良好な圧入性状が期待できることから圧入対象となると考えた（図 2.7-1 青い楕円部）。また、凝灰岩相全体としてはそれほど良好な性状は期待できないが、部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、圧入対象となると考えた（図 2.7-1 赤い楕円部）。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表 2.7-1 にまとめる。

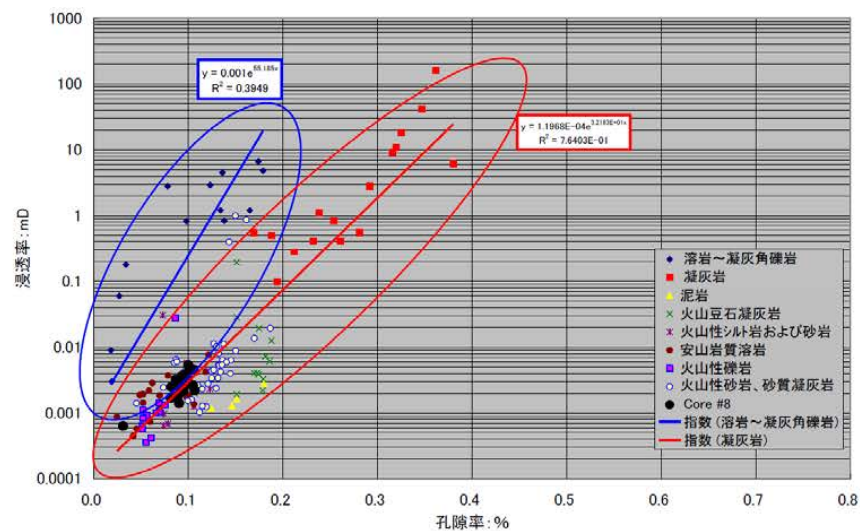


図 2.7-1 コア試料の孔隙率と浸透率のクロスプロット

表 2.7-1 滝ノ上層 T1 部層 貯留層性状一覧

項 目	
対象深度	約2,400～3,000m(垂直深度)
層厚	約600m
岩相	溶岩～凝灰角礫岩、凝灰岩
孔隙率	5～18%(苦小牧CCS-1コア試験:封圧下) 3～19%(周辺坑井のコア試験:封圧下)
浸透率	0.68～1.18mD(苦小牧CCS-1圧入テスト解析結果)* 0.001～0.01mD(苦小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) 0.002～7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) 0.01mD～2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果)
水圧入テスト (苦小牧CCS-1)	最大650kl/日(掘削深度2,907～3,698mのうち186m)*

*圧力・温度測定結果から圧入区間は2,907～2,931mのみと判断した。

2.7.2 遮蔽層

遮蔽対象層となる振老層および平取+軽舞層は、約1,100mの層厚を有する。苦小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部で等価泥水比重1.96の強度を持つことを確認した。

苦小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、過去に遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が 8.2×10^{-6} ～ 36.7×10^{-6} mD、スレシヨルド圧力が1.29MPa～15.02MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといった比較的低い分析値が得られているものの、CO₂貯留条件と同様の条件で分析をしたところ、11.72MPa以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取+軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表2.7-2にまとめる。

表 2.7-2 滝ノ上層 T1 部層に対する遮蔽層性状一覧

項 目	
層序	振老層および平取+軽舞層
岩相	泥岩
層厚	約1,100m
孔隙率	12.4～18.0%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下)
浸透率	$8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6} \text{mD}$ (苫小牧CCS-1コア試験:水浸透率)
スレシヨルド圧力	1.29～12.3MPa※以上(苫小牧CCS-1コア試験: N_2 -水系残差圧力法) 11.72MPa※以上(苫小牧CCS-1コア試験: CO_2 -水系段階昇圧法) ※ブレイクスルーしなかったことから測定値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断。
リークオフ圧力 (苫小牧CCS-1 リークオフテスト)	45.3MPa(等価泥水比重1.96) (振老層(苫小牧CCS-1)2,352mVD(垂直深度))

2.7.3 地質モデル構築

(1) 岩相分布・性状分布の推定

滝ノ上層は、火山岩起源であることから、砂岩などの堆積岩層と比較して不均質性が高く、 CO_2 挙動予測シミュレーションを実施するためには、空間的な岩相分布およびその性状分布の推定が特に重要となる。このため、3Dデータを活用した岩相分布・性状分布の推定を実施し、 CO_2 挙動予測シミュレーションの地質構造モデルへ反映させた。

具体的には、まずスケルトン・アトリビュート解析と呼ばれる手法を用いて弾性波形の特徴を強調し、次にSOM (Self-organizing Maps: 自己組織化マップ) 解析による波形分類を行い、さらにクラスター解析の代表的な手法である K-means 法により各分類の境界を決定し、最後に坑井Aにおける溶岩～凝灰角礫岩の区間との比較により、この岩相を示す弾性波形を決定することにより、3Dデータ上で溶岩～凝灰角礫岩の分布領域を推定した。

そして、溶岩～凝灰角礫岩についてはコア試料と物理検層データから、AI (Acoustic Impedance: 音響インピーダンス: 密度×弾性波速度) と孔隙率とが逆相関関係にあることから、3Dデータ上も溶岩～凝灰角礫岩の分布領域ではAIと孔隙率とが逆相関関係にあると考えた。

一例として、図2.7-2に滝ノ上層T1部層下部の岩相分布(K-means Index)を、図2.7-3に3Dデータから取得した滝ノ上層T1部層下部の音響インピーダンスを示す。

なお、苫小牧CCS-1が掘削された場所周辺は、高AI領域(孔隙率・浸透率が低い)

であった。

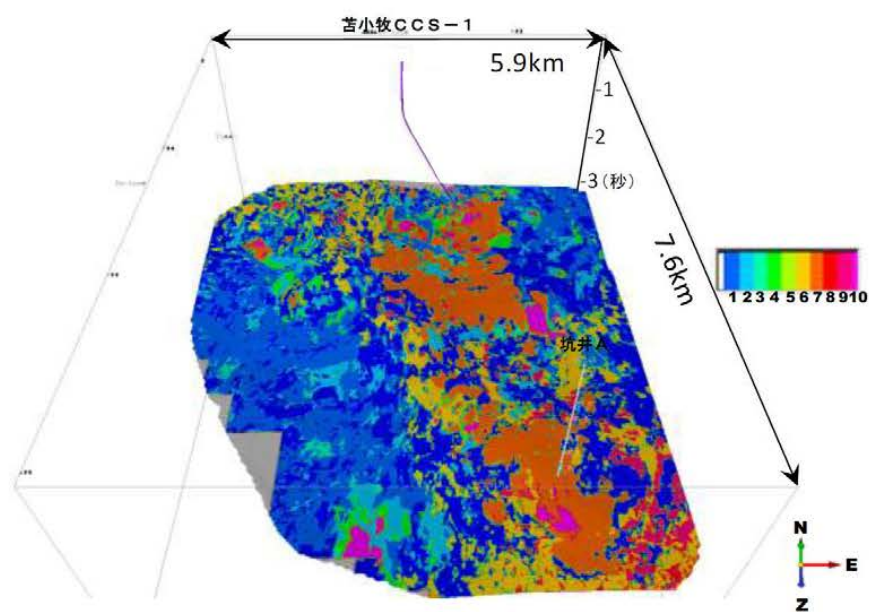


図 2.7-2 滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index)

注) オレンジの部分が良い貯留層性状が期待される岩相 (溶岩～凝灰角礫岩相)

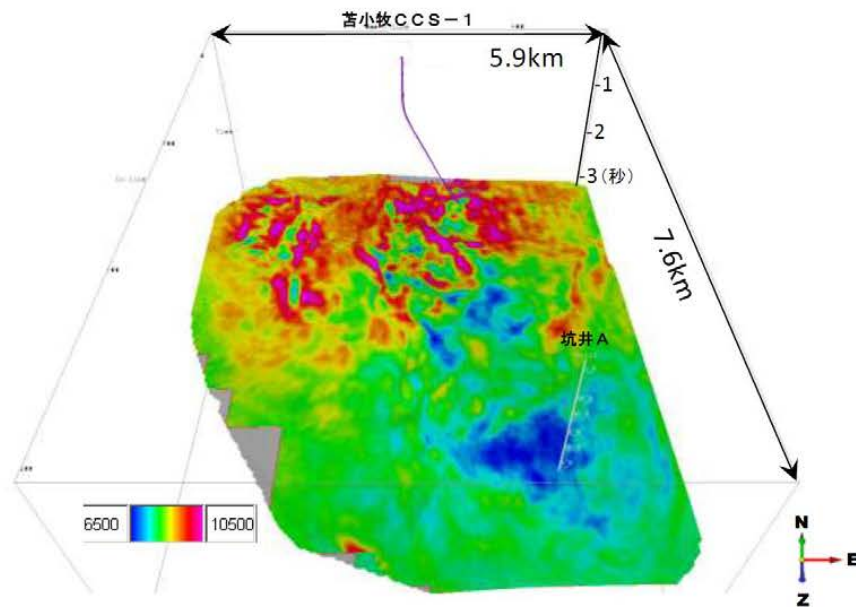


図 2.7-3 滝ノ上層 T 1 部層下部の音響インピーダンス

注) 青色の部分が低 A I で高孔隙率と考えられる箇所。高浸透率である可能性も高い。

(2) 地質構造モデル構築

CO₂の挙動予測シミュレーションに必要な貯留層モデルを構築するため、3Dデータで解釈に用いた各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

地質構造モデルの構築には、構造地質解釈で作成された層準（上位より、第四系基底・鵜川層基底・萌別層基底・荷葉層上部基底・荷葉層下部基底・平取+軽舞層基底・滝ノ上層上限（振老層基底）・滝ノ上層 T 1 部層上部基底・滝ノ上層 T 1 部層基底・滝ノ上層基底）を用いた。深度変換された滝ノ上層 T 1 部層上限のモデル断面位置を図 2.7-4 に、主要な層準の東西断面（地質モデル断面）を図 2.7-5 に各々示す。

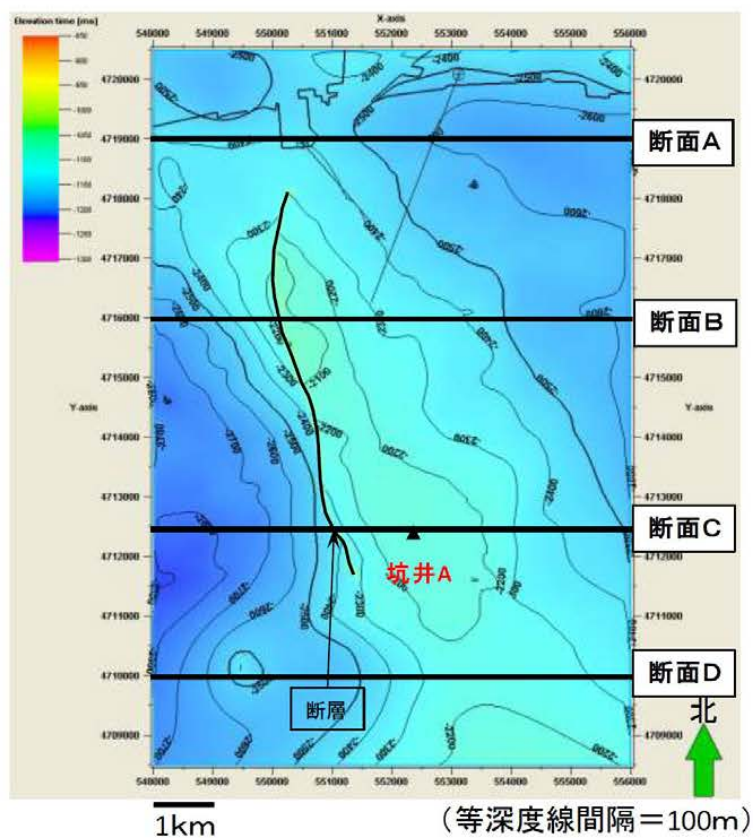
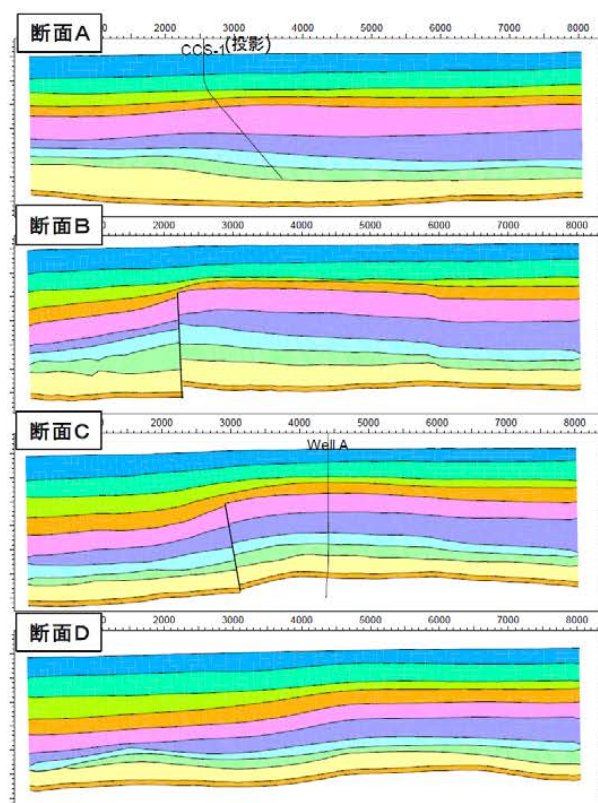


図 2.7-4 モデル断面位置（構造図は滝ノ上層 T 1 部層上限）
（図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標）



0 500 1000 1500 2000 2500m

- 第四系
- 鶴川層
- 萌別泥岩層【遮蔽層】
- 萌別砂岩層【貯留対象層】
- 荷葉層【遮蔽層】
- 平取+軽舞層【遮蔽層】
- 振老層【遮蔽層】
- 滝ノ上層T1部層(上部)【貯留対象層】
- 滝ノ上層T1部層(下部)【貯留対象層】

図 2.7-5 地質モデル断面
(苫小牧 CCS-1 は投影表示)

さらに、CO₂挙動予測シミュレーションを行うにあたり、各層準内に以下のようにグリッドセルを作成した。

・水平方向のグリッドセルサイズ

東西方向 (i) および南北方向 (j) : 100m

(i 方向セル数: 80 セル、J 方向セル数: 120 セル)

・垂直 (k) 方向のグリッドセルサイズ

鷗川層 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 1~3)
萌別層 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 4~6)
荷菜層上部 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 7~9)
荷菜層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 10~14)
平取+軽舞層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 15~19)
振老層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 20~24)
滝ノ上層 T 1 部層上部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 25~57)
滝ノ上層 T 1 部層下部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 58~96)
滝ノ上層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 97~101)
南長沼層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 102~106)

構造モデルの鳥瞰図を図 2.7-6 に示す。滝ノ上層 T 1 部層はCO₂圧入対象層準であり、シミュレーションを詳細に行うため上下の地層よりも小さめの垂直方向サイズとなるようにした。

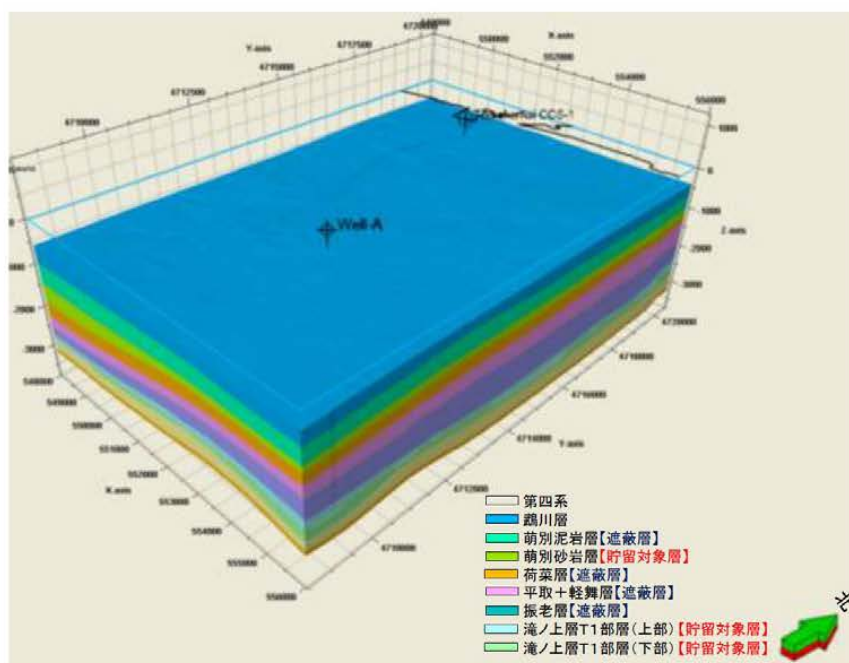


図 2.7-6 三次元地質モデル鳥瞰図

(3) 属性モデル構築

作成した構造モデルの滝ノ上層T1部層とそれ以外の層準に属性（岩相、孔隙率および浸透率）をそれぞれ与え、CO₂挙動予測シミュレーションのための地質モデルを作成した。

まず、CO₂圧入対象層である滝ノ上層T1部層における属性値分布は、3Dデータ、苫小牧CCS-1および坑井Aのデータより、地球統計学的手法を用いて、岩相、孔隙率および浸透率の分布が確率的に50個の具現モデルを作成した。図2.7-7に作業フロー図を示す。

まず、図2.7-2に示した3Dデータの解析により求められた3D範囲（図2.1-1）内の岩相分布を溶岩～凝灰角礫岩相（図中の橙色）と凝灰岩相（図中の橙色以外）として、構造モデルへ与えた（図2.7-7のFacies-①）。また、図2.7-3に示した音響インピーダンス（AI）の分布から岩相ごとにAIと孔隙率の関係式を用いて3D範囲内の孔隙率分布を構造モデルへ与えた。（図2.7-7のΦ-②）。また、苫小牧CCS-1および坑井Aの検層データより求められた孔隙率から坑井孔隙率（図2.7-7のΦ-③）を作成した。

次に、Facies-①から逐次インディケータシミュレーション（Sequential Indicator

Simulation : SIS) を用いて、モデル構築範囲 (図 2.1-1) 全体に拡張した岩相分布 (図 2.7-7 の Facies-④) を作成した。Facies-④が具現モデルの岩相分布となる。この岩相ごとに逐次ガウシアンシミュレーション (Sequential Gaussian Simulation : SGS) を用いて、モデル構築範囲全体に拡張した孔隙率分布 (図 2.7-7 の Φ -⑤) を作成した。

具現モデルの孔隙率分布 (図 2.7-7 の Φ -⑥) は、孔隙率分布 Φ -⑤および坑井孔隙率 Φ -③を使用して SGS にて作成した。なお、本 SGS のパラメータは Φ -⑤作成時と同じ値を使用し、2 つの岩相における孔隙率の出現確率は 3 D 範囲内での出現確率 (図 2.7-8) とした。

具現モデルの浸透率分布 (k -⑦) は孔隙率分布 (Φ -⑥) に対して、苫小牧 CCS-1 の周辺坑井と苫小牧 CCS-1 のコア分析結果から得られた以下の岩相別の孔隙率-浸透率関係式 (図 2.7-1) を用いて作成した。

凝灰岩相 : $k = 0.00011968e^{32.183\phi}$

溶岩～凝灰角礫岩相 : $k = 0.001e^{55.185\phi}$

ここで、 k : 浸透率[mD]、 ϕ : 孔隙率[frac]である。

本属性モデルでは孔隙率は AI より求めたが、浸透率と AI の関係については考察されていないため、10,000mD を超える浸透率が導き出されることがある。そのため、上記関係式により求められた浸透率分布に対して、10,000mD 以上の浸透率を 10,000mD とする補正を行った。

以上の作業を 1 フローとして、岩相分布 (Facies-④)、孔隙率分布 (Φ -⑥)、浸透率分布 (k -⑦) の作成を繰り返すことにより、岩相分布・孔隙率分布・浸透率分布について確率的に 50 個の具現モデルを作成した。参考例として、50 個の内から 4 つの具現モデルにおける孔隙率分布を図 2.7-9 に示す。

他の層準における属性値は、苫小牧 CCS-1 の振老層から採取されたコアの分析値を一樣に分布させた。

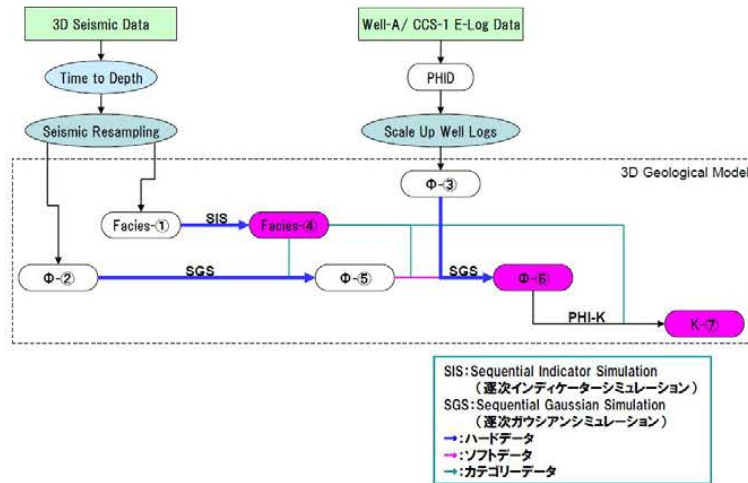


図 2. 7-7 滝ノ上層 T 1 部層内の属性値分布作成における作業フロー

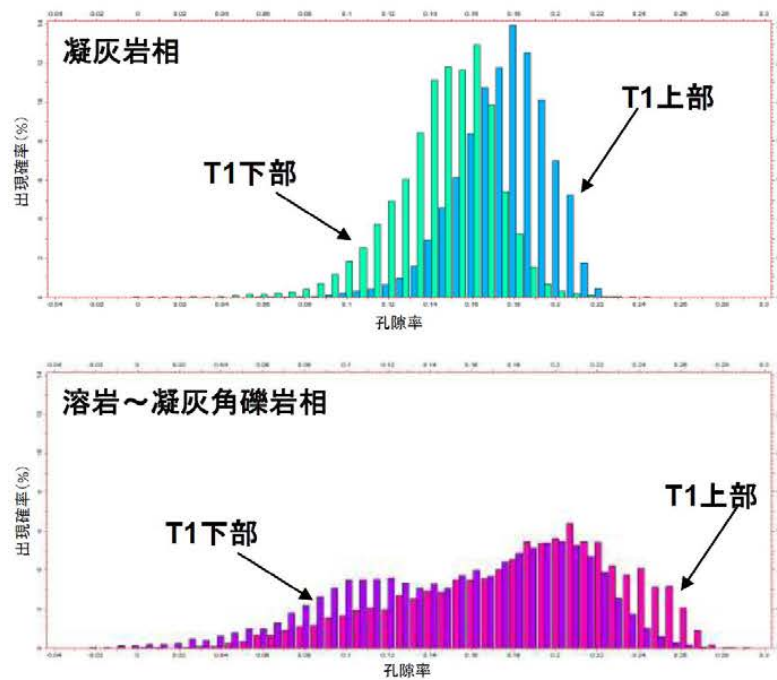


図 2. 7-8 3 D 探査範囲内で取得された孔隙率の出現確率

■: 滝ノ上層 T 1 部層上部溶岩～凝灰角礫岩相、■: 滝ノ上層 T 1 部層上部凝灰岩相、
■: 滝ノ上層 T 1 部層下部溶岩～凝灰角礫岩相、■: 滝ノ上層 T 1 部層下部凝灰岩相)

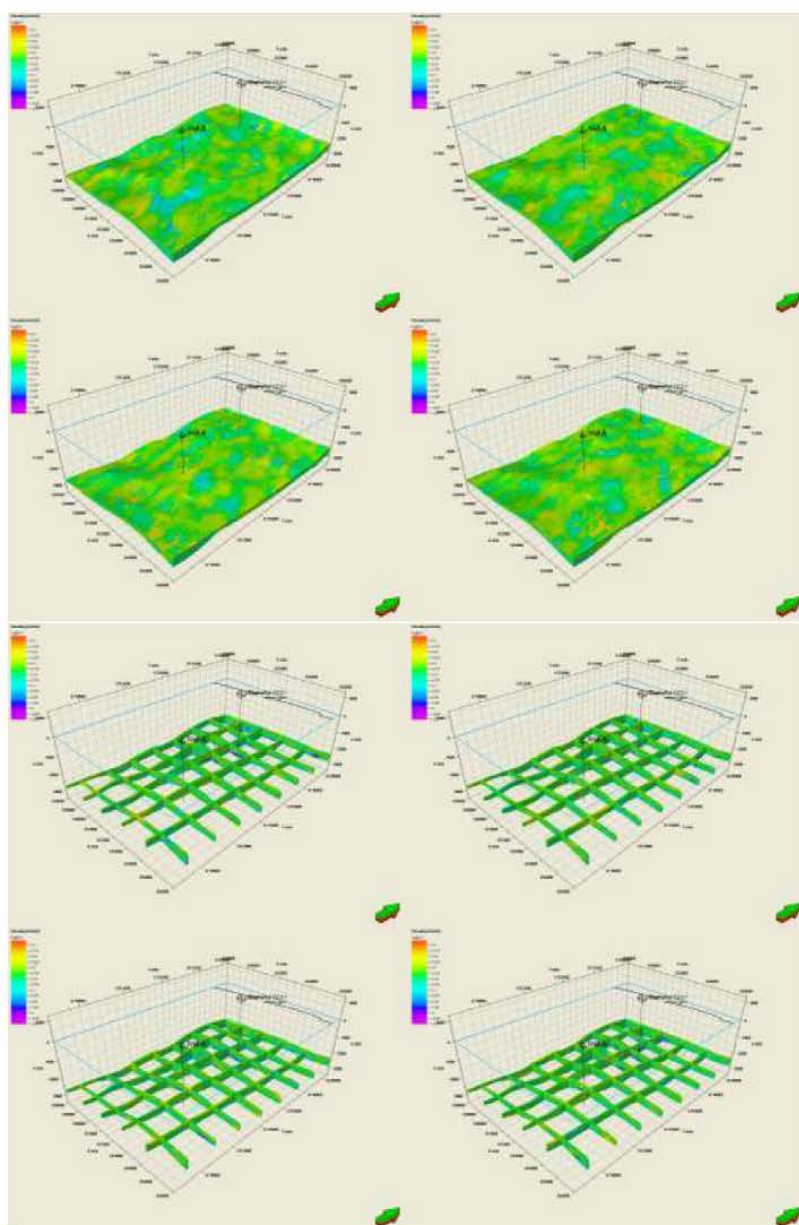


図 2.7-9 50 個の内 4 個の具現モデルの参考例：淹ノ上層 T 1 部層の孔隙率分布
(上図：全体表示、下図：格子状に断面を表示、図中の矢印は北を示す)

2.7.4 CO₂挙動予測シミュレーション

構築した50個の地質モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを行い、貯留層および遮蔽層の性能評価を実施した。シミュレーションでは、CO₂を25万トン/年×3年間圧入し、圧入期間中の圧入性やその後の貯留CO₂の挙動予測等を行った。CO₂挙動予測シミュレーションの結果および評価については、第3章に示す。

2.7.5 弾性波探査シミュレーション

CO₂挙動予測シミュレーションで得られたCO₂の拡がりの予測結果から、弾性波探査によるCO₂賦存範囲の検出可能性等を検討することを目的として、弾性波探査シミュレーションを行った。シミュレーションでは、作成した二次元速度構造モデルを入力として差分法による二次元弾性波探査シミュレーション(P波)を実施し、合成弾性波記録を作成した。

CO₂圧入前後の貯留層の変化による反射断面での応答を見るため、CO₂累積圧入量12.5万トン、25万トン、50万トン、75万トンの各場合において、CO₂圧入開始前の記録との差を求めた。これにより、12.5万トン圧入の時点でCO₂の拡がりは認識可能であり(図2.7-10)、25万トン圧入の時点ではCO₂の拡がりを明確に検知できることがわかった(図2.7-11)。これにより滝ノ上層T1部層においては、累積CO₂圧入量20万トン、25万トン、30万トンという圧入過程で弾性波探査を繰り返し実施することにより、CO₂の挙動(拡がっていく様子)が検知可能と判断した。

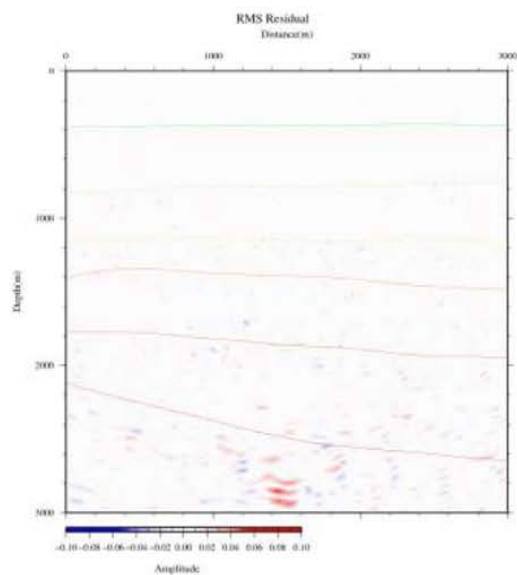


図 2.7-10 差分（深度断面、滝ノ上層T1部層、CO₂圧入 12.5 万トン圧入後）

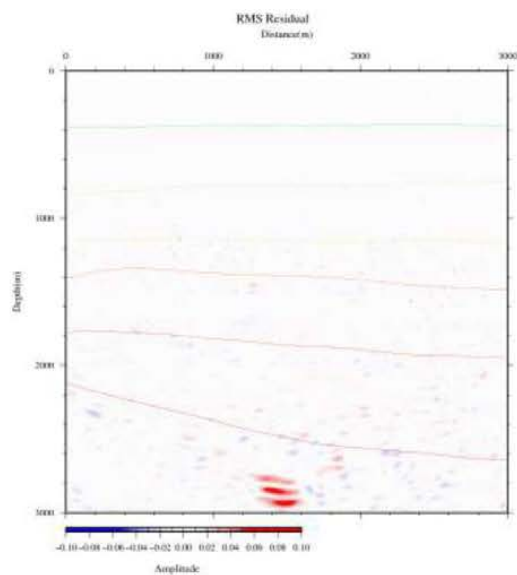


図 2.7-11 差分（深度断面、滝ノ上層T1部層、CO₂圧入 25 万トン圧入後）

2.8 萌別層解析結果

萌別層はシルト岩～泥岩からなる上部（萌別層泥岩層）と主に砂岩からなる下部（萌別層砂岩層）に分けられる。萌別層砂岩層を貯留層とし、萌別層泥岩層を遮蔽層と想定した。

2.8.1 貯留層

萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約100mである。三次元弾性波探査では、萌別層下部に連続の良い強反射が認められることから砂礫岩層の発達を示唆される。この強反射は検討地域の北東部で顕著であり、南および西に向かって減衰するため、砂礫岩層は北東部を中心に発達していると解釈される。

本層準は比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられることから、砂岩の分布範囲については注意が必要である。そこで、苫小牧CCS-1および3Dデータを用いて、堆積学的検討を行った。その結果は以下の通りである。

萌別層砂岩層は、シーケンス層序学という高海水準期堆積体（HST）に相当し、ファンデルタ・陸棚（Shelf）・斜面（Slope）の3つに分類できる（図2.8-1）。このうち砂岩の発達が最も期待できるのがファンデルタで、陸棚、斜面と砂岩の割合が少なくなっていく。少なくとも5つのファンデルタが北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈した。ファンデルタは、堆積物供給源である北東側がより砂岩が多く、南西に向かって泥岩が多くなる傾向にあると推定した。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表2.8-1にまとめる。

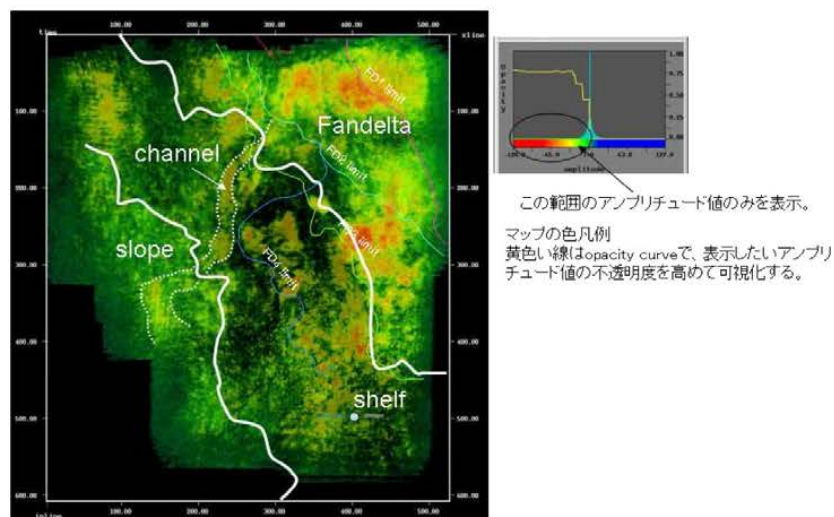


図 2.8-1 萌別層HST区間の堆積相解釈図（図の上部の方角は北）
（暖色系は負の高い振幅値、寒色系は負の低い振幅値を示す。正の振幅は非表示。）

表 2.8-1 萌別層砂岩層 貯留層性状一覧

項 目	
対象深度	約1,100～1,200m(垂直深度)
層厚	約100m
岩相	砂岩(礫質砂岩、シルト岩を伴うファンデルタ堆積物)
孔隙率	25～40%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) 20～40%(物理検層解析結果)
浸透率	9～25mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) 1～1,000mD(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下、空気) 1～120mD(物理検層解析結果)
水圧入テスト (苫小牧CCS-1)	最大1,200kl/日(掘削深度1,077～1,217mのうち57.5m)

2.8.2 遮蔽層

萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数 100m の比較的浅い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さがあり（図 2.8-2）、コア試験結果からは水浸透率が $0.8 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-3}$ mD、スレシールド圧力が 0.75MPa、

1.65MPa、1.67MPaの結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で1.50の強度を確認している。

以上の調査、分析結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表2.8-2にまとめる。

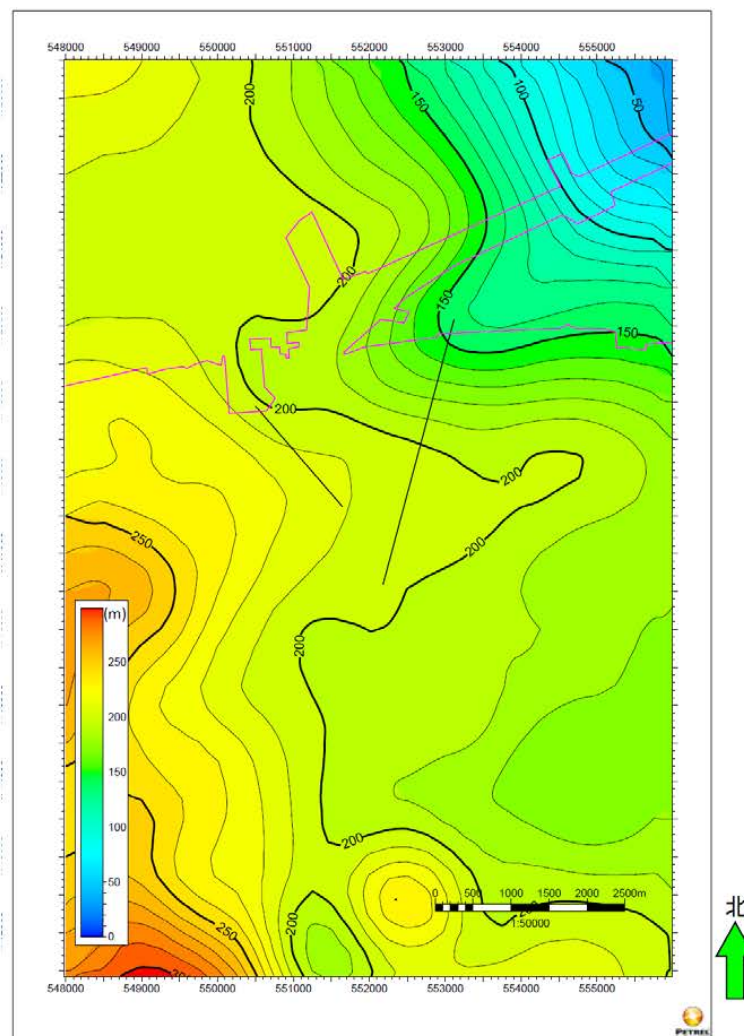


図 2.8-2 萌別層泥岩層の等層厚線図（等層厚線間隔：10m）

表 2.8-2 萌別層泥岩層 遮蔽性状一覧

項 目	
層序	萌別層泥岩層(萌別層上部)
岩相	シルト岩～泥岩
層厚	約200m
孔隙率	32.4～37.2%(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下)
浸透率	$0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ (苫小牧CCS-2コア試験:水浸透率)
スレショルド圧力	0.75, 1.65, 1.67MPa(苫小牧CCS-2コア試験:CO ₂ -水系段階昇圧法)
リークオフ圧力 (苫小牧CCS-2 リークオフテスト)	14.6MPa(等価泥水比重:1.50) (萌別層泥岩層(苫小牧CCS-2)991mVD(垂直深度))

2.8.3 地質モデル構築

(1) 構造モデル構築

シミュレーションを実施する際に必要な地質モデルを構築するため、苫小牧3Dデータで解釈された各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

構造モデル構築には、地質構造解釈で作成されたホライゾン(上位より、鵠川層上限、萌別層上限、萌別層海進期堆積体(TST)上限、萌別層高海水準期堆積体(HST)上限、萌別層HSTデルタ上部基底、萌別層HST基底、荷菜層上部基底)を用いた。深度変換された萌別層砂岩層上限(萌別層HST上限)のモデル断面位置図を図2.8-3、主要な層準の東西モデル断面を図2.8-4に各々示す。

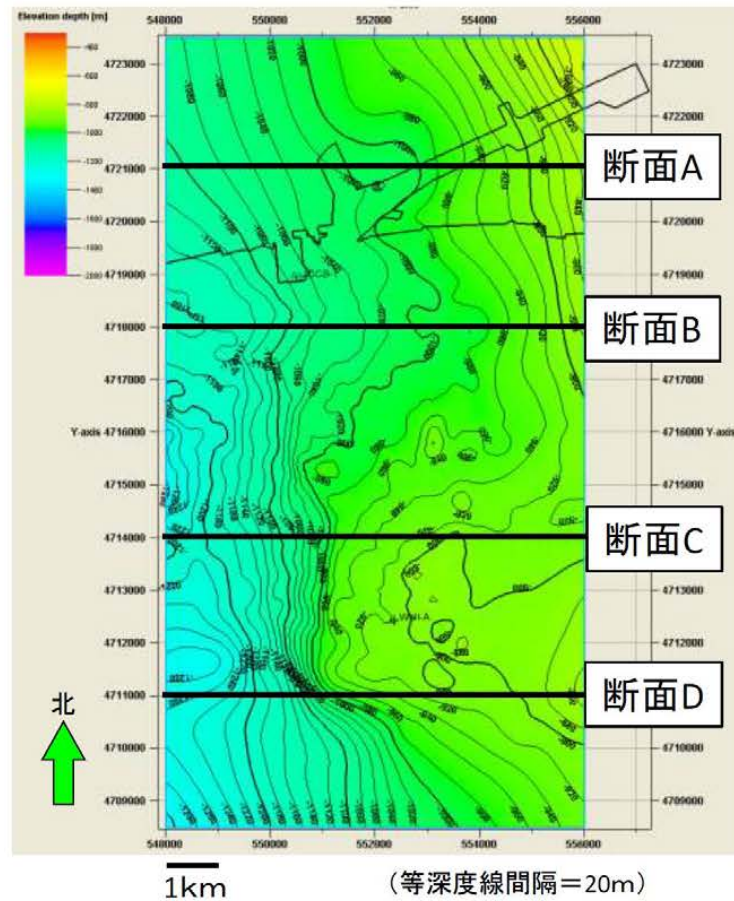


図 2.8-3 モデル断面位置図（構造図は萌別層砂岩相（HST）上限）
（図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標）

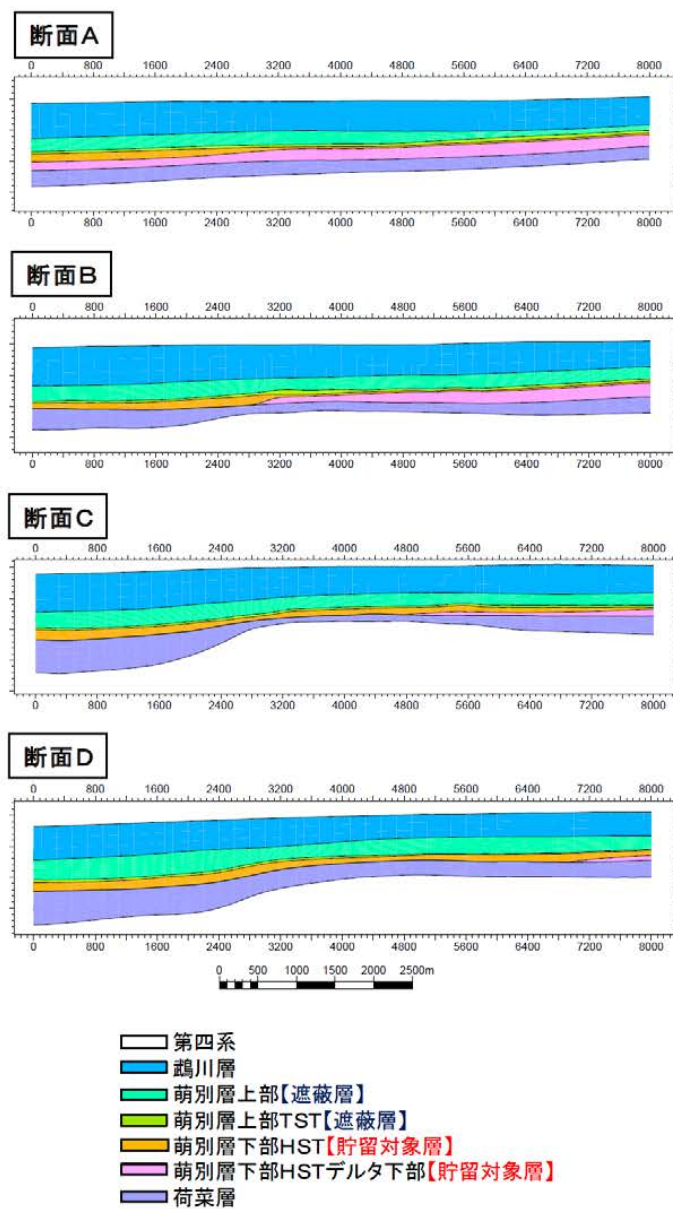


図 2.8-4 モデル断面図（上から順に断面 A～D、スケールは m）

CO₂挙動予測シミュレーションを行うため、各層準内に以下のようにグリッドセルを作成した。

・水平方向のグリッドセルサイズ

X 方向 (i) および Y 方向 (j) : 200m 8km×15km

(i 方向セル数: 40 セル、j 方向セル数: 75 セル)

・垂直 (k) 方向のグリッドセルサイズ

鵜川層 : 3 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 1~3)

萌別層上部 : 10 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 4~13)

萌別層 T S T : 2 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 14~15)

萌別層 H S T 上部 : 15m ごとに分割 (k 方向セル番号: 16~25)

萌別層 H S T 下部 : 15m ごとに分割 (k 方向セル番号: 26~38)

荷菜層 : 5 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 39~43)

主たる遮蔽層である萌別層上部は、CO₂貯留対象領域では十分な厚さがあり良好な遮蔽性能が期待できる。ただし、北東部の陸域では遮蔽層が徐々に薄化していく傾向が確認されていることから、北東部陸域においては薄い遮蔽層を設定した。

萌別層 T S T については便宜上遮蔽層と呼んでいるが、苫小牧 C C S - 1 では上部に砂岩層、下部に泥岩層が認められたため、その両層を表現するためにレイヤー数を 2 とした。

萌別層 H S T は、CO₂圧入対象層準の萌別層砂岩相でありシミュレーションを詳細に行うため、上下の地層よりも小さめの垂直方向のセルサイズとなるようにした。なお堆積物の堆積方向を加味して、萌別層 H S T 上部は Follow Base と呼ばれる手法で、萌別層 H S T 下部は Follow Top と呼ばれる手法でレイヤーを作成した (図 2.8-5)。

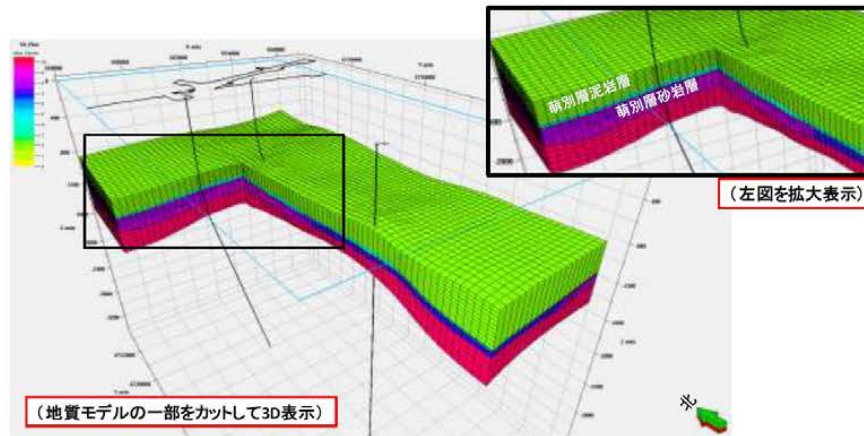


図 2.8-5 グリッドモデル概観

(2) 属性モデル構築

構築した構造モデルを基に、各セルに属性を与えた。属性は、堆積相解析で設定した堆積相区分として与えた。属性モデルに与えた堆積相区分概念を図 2.8-6 に示す。萌別層 HST は堆積環境により西よりスロープ (6)、陸棚 (7)、デルタ上部 (8)、デルタ下部 (9) の 4 つに区分される。

萌別層 TST は、沖側 (3: 泥岩層)、陸側上部 (4: 砂岩層) ならびに陸側下部 (5: 泥岩層) に区分した。

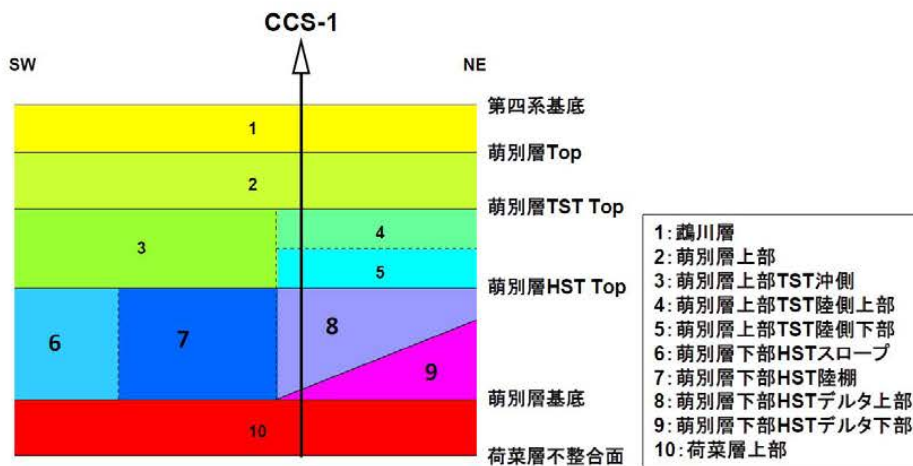


図 2.8-6 堆積相区分概念図

2.8.4 CO₂挙動予測シミュレーション

構築した貯留層モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを行い、貯留層および遮蔽層の性能評価を実施した。シミュレーションでは、CO₂を25万トン/年×3年を目途に圧入し、圧入期間中およびその後の長期間にわたって貯留CO₂の挙動予測等を行っている。CO₂挙動予測シミュレーションの結果および評価については、第3章で示す。

2.8.5 弾性波探査シミュレーション

滝ノ上層T1部層と同様に、CO₂挙動予測シミュレーションで得られたCO₂の拡がりの予測結果から、弾性波探査によるCO₂賦存範囲の検出可能性等を検討することを目的として、弾性波探査シミュレーションを行った。

萌別層砂岩層ではCO₂累積圧入量12.5万トンの時点で、CO₂の拡がり は明確に検知できることがわかった(図2.8-7)。このため萌別層砂岩層においては、累積CO₂圧入量10万トン、12.5万トン、15万トンというCO₂圧入過程で弾性探査を繰り返し実施することにより、CO₂挙動(拡がっていく様子)が検知可能と判断した。CO₂累積圧入量25万トン時点の結果を図2.8-8に示す。

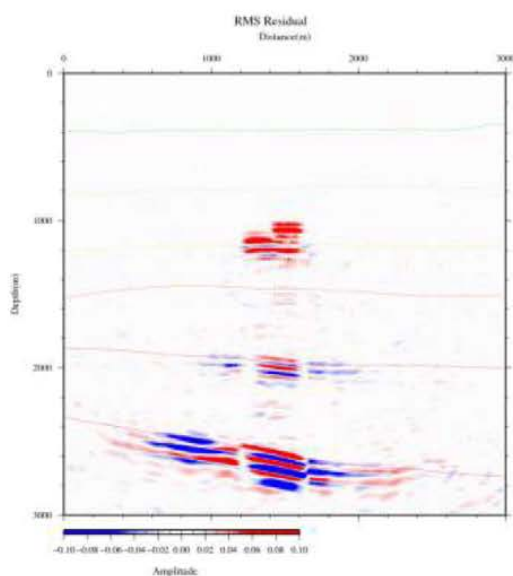


図 2.8-7 差分(深度断面、萌別層砂岩層、CO₂圧入12.5万トン圧入後)

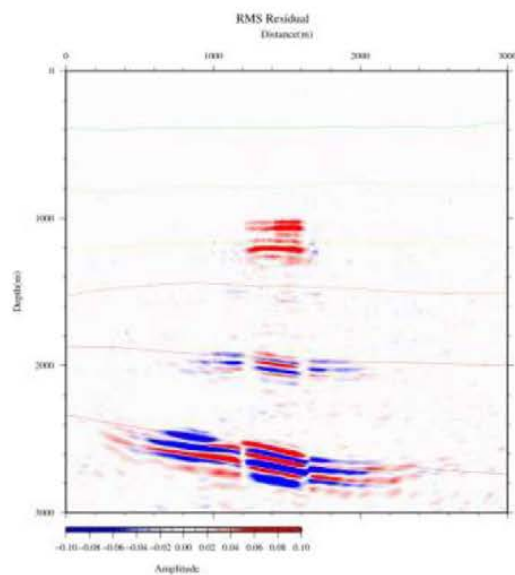


図 2.8-8 差分（深度断面、萌別層砂岩層、CO₂圧入 25 万トン圧入後）

第3章 貯留層総合評価

3.1 貯留層の総合評価

貯留層総合評価においては、第2章で構築した貯留層モデルを用いてCO₂挙動予測シミュレーションを実施し、その結果を基に計画通りのCO₂圧入が可能か、貯留層からのCO₂の漏出は生じていないか、長期間にわたって計画通りの範囲にとどまっているかを評価した。以下、滝ノ上層および萌別層の評価結果について示す。

3.1.1 滝ノ上層評価結果

(1) 貯留層評価

2.7.1で記載の通り、滝ノ上層は火山性碎屑物を含む火山岩層であり、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。滝ノ上層T1部層（層厚が約600m）は、さらに上部の凝灰岩卓越層と下部の火山岩卓越層に分けられる。

溶岩～凝灰角礫岩相では良好な圧入性状が期待できることから全体が圧入対象となり、凝灰岩相は部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、一部が圧入対象となり得ると考えられる。

(2) 遮蔽層評価

2.7.2で記載の通り、遮蔽対象層となる振老層および平取+軽舞層は、約1,100mの層厚を有する。苫小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部でリークオフ圧力が等価泥水比重1.96の強度を持つことを確認した。

苫小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないものと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が 8.2×10^{-6} ～ 36.7×10^{-6} mD、スレシヨルド圧力が1.29MPa～12.3MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといった比較的低い分析値が得られているものの、CO₂-水系の条件で分析した場合には、11.72MPa以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取+軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。

(3) シミュレーション概要

① 概要

構築した貯留層モデルを用いて、CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレータは、Computer Modelling Group Ltd. 社のGEM (ver2010.12) を使用した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛管圧力と低浸透性による物理的トラッピング、残留ガス飽和率とガス相対浸透率のヒステリシスによる残留CO₂トラッピング、CO₂の地層水への溶解による溶解トラッピングである。

圧入位置については、陸上から掘削可能な圧入井の仕様に応じて設定した。すなわち、CO₂圧入井は陸上から南西方向に掘削すると仮定し、圧入井における滝ノ上層T1部層の全区間に対してCO₂を圧入した。最終坑径を8.5インチ（半径0.10795m）、チュービング径を3.5インチ（内半径0.038m）とした。

圧入時に許容される最大坑底圧力については、苫小牧CCS-1の振老層下部でのリークオフ圧力が等価泥水比重で1.96であるので、貯留層上限深度での地層破壊圧力を計算し、その90%を圧入圧力上限とした。すなわち、CO₂圧入井において、グリッドモデルでの貯留層最上位での垂直深度2,419.4mから地層破壊圧力を求め、この90%（41,853kPa）をCO₂圧入時に許容される最大坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）とした。

CO₂の圧入目標量は25万トン/年×3年として、第2章で述べた50個のモデルに対してシミュレーションを実施した。

② パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧CCS-1のデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など）および文献値により、表3.1-1に示す値を用いた。

表 3.1-1 シミュレーションパラメーター一覧

モデル	滝ノ上層 T 1 部層 2011 モデル		
サイズ	8km × 12km × 4,000m (ideal volume 24km × 24km × 4,000m)		
グリッド	80 × 120 × 106 Grid		
アクティブ・ブロック数	384,050		
基準温度	91.0°C (2,419.4m)		
基準圧力	34,370kPa (2,419.4m)		
CO ₂ 圧入レート、圧入期間	250,000 トン/年 × 3 年		
圧入圧力上限	41,853kPa		
岩石性状	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
平均孔隙率	0.125 Bennion (2005) ¹⁾	0.127	0.150
平均浸透率 (mD)	2.7	0.0072	0.000035
圧縮率 (kPa ⁻¹)	8.073 × 10 ⁻⁷ 測定値		
塩分濃度 (ppm NaCl)	35,100 ([Cl ⁻]=21,300ppm)		
相対浸透率	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
気相 相対浸透率 K _{rg}	Bennion (2005) ¹⁾		Corey (1954) ²⁾
液相 相対浸透率 K _{rw}			van Genuchten (1980) ³⁾
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.04 Bennion (2005) ¹⁾		0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.558 Bennion (2005) ¹⁾		0.8
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.241 from default value of GEM		—
毛管圧力曲線	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
	Bennion (2006) ⁴⁾ , van Genuchten (1980) ³⁾		測定値
P _c (kPa)	28.8	428.1	469

【参考文献】

- 1) Bennion, B., 2005, Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin: *paper SPE 95547*.
- 2) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly*, November, 38-41.
- 3) van Genuchten, M. Th., 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- 4) Bennion, B., 2006 The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-Brine systems: *paper SPE 99325*.

(4) シミュレーションによるCO₂の圧入挙動① CO₂圧入時の挙動

50 個のモデルに対して、25 万トン/年×3 年間の挙動予測シミュレーションを行ったところ、全てのモデルにおいて 25 万トン/年×3 年間の圧入が可能であった。

そこで、このシミュレーションの結果において圧入終了時における坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）の圧力上昇量で序列をつけ、50 個のモデルの累積確率分布を作成し、圧力上昇量が当該モデル以下になる確率をそれぞれ P10、P50、P90 のパーセンタイル値として設定した（図 3.1-1）。これらの 3 つのモデルについて CO₂ 挙動予測シミュレーションを行った。

- 1) P10 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 10%
- 2) P50 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 50%
- 3) P90 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 90%

これらのモデルに与えられた浸透率は図 3.1-2 のようになっている。

図 3.1-3～図 3.1-5 に 3 つの貯留層モデル（P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル）における圧入期間（3 年間）の CO₂ 圧入に伴う坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的变化を示す。なお、3 年間の CO₂ 飽和率分布および溶解 CO₂ 分布については、3.1.1 (5) において述べる。

3 つのシミュレーションモデルにおける、圧入終了直前の坑底圧力は P10 モデルで 36,180kPa（ $\Delta P=1,800\text{kPa}$ ）、P50 モデルで 36,580kPa（ $\Delta P=2,200\text{kPa}$ ）、P90 モデルで 37,660kPa（ $\Delta P=3,290\text{kPa}$ ）であり、いずれのモデルにおいても設定した圧入圧力上限（41,853kPa）を大きく下回って、25 万トン/年×3 年間の CO₂ を全量圧入が可能である。また、いずれのモデルにおいても貯留層圧力は圧入終了後に速やかに低下し、圧入終了 5 年後にはほぼ初期貯留層圧力に近い約 35,000kPa（ $\Delta P=700\text{kPa}$ ）まで低下している。

なお、2.7.3 で述べた通り、滝ノ上層 T1 部層は堆積岩と比較して不均質性・異方が

高く、掘削後の解析結果から、苫小牧CCS-1を掘削した領域は、滝ノ上層T1部層の高A I（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層T1部層の低A I（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

② 貯留層圧力分布

3年間のCO₂圧入終了時点における帯水層圧力の変化（圧入前の初期圧力からの変化量）を図3.1-6～図3.1-8に示す。いずれのモデルにおいても圧力の拡がりは圧入井を中心にほぼ南北に長軸をもつ楕円状となる。

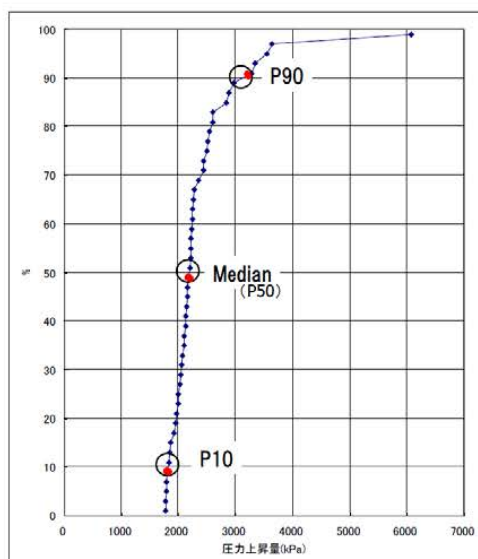


図 3.1-1 50 個のモデルの 3 年間の圧入による圧力上昇量の累積確率分布

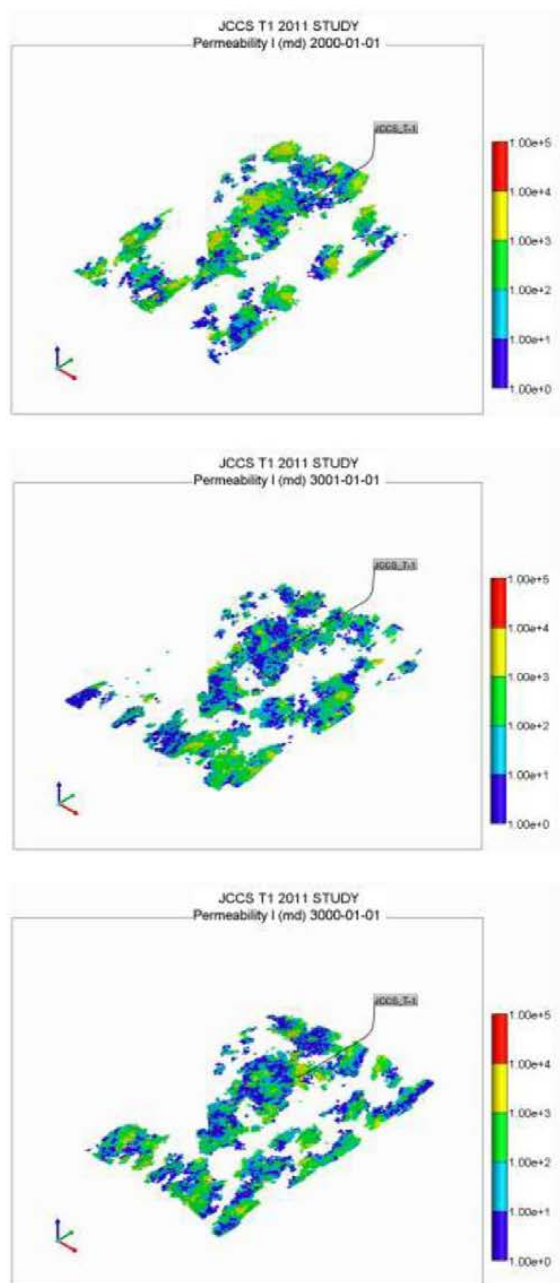


図 3. 1-2 浸透率(単位 : md)分布 (P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル)

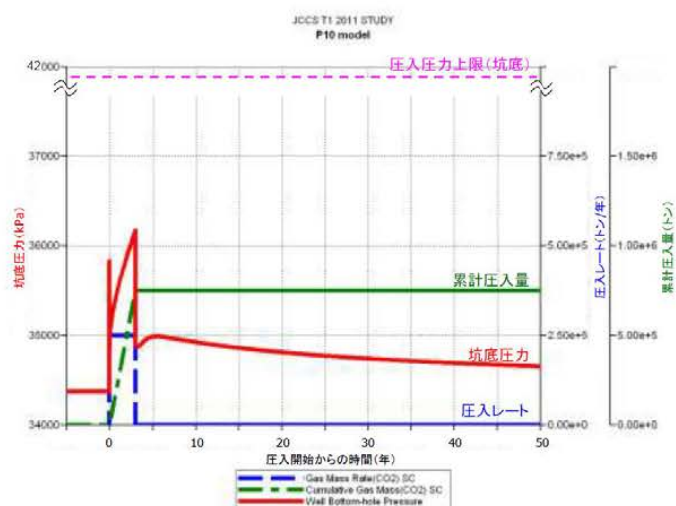


図 3.1-3 P10 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

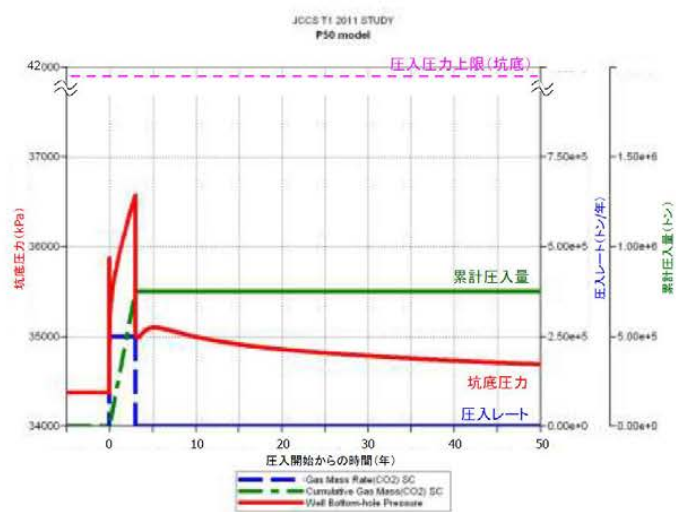


図 3.1-4 P50 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

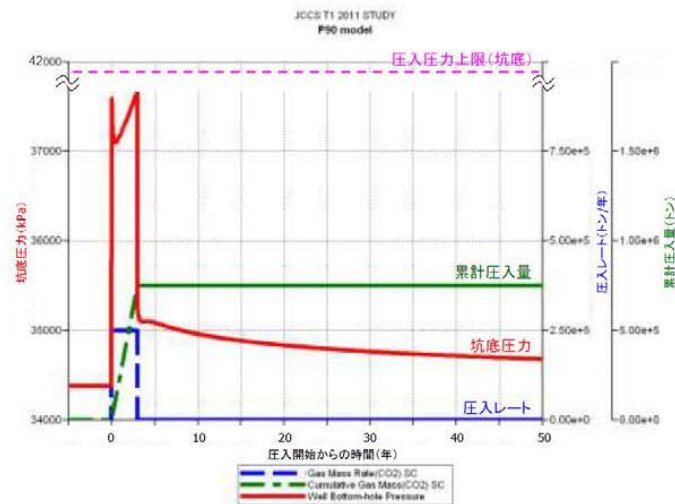


図 3.1-5 P90 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

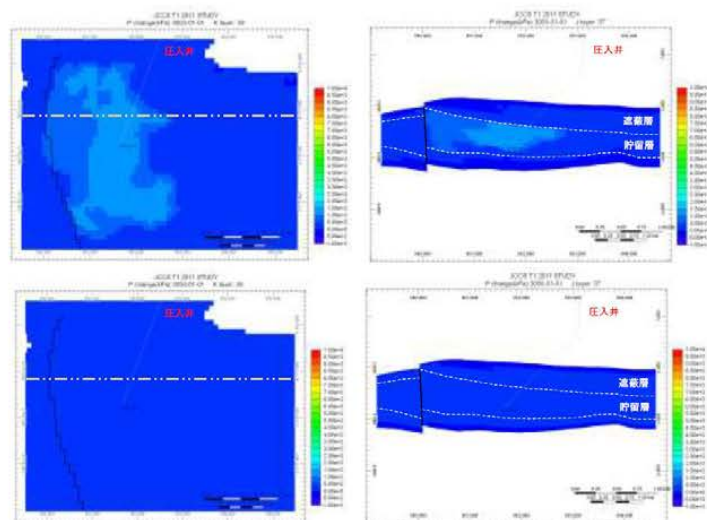


図 3.1-6 CO₂ 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（P10 モデル）

（上：圧入終了時（3 年後） 下：50 年後）

（左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

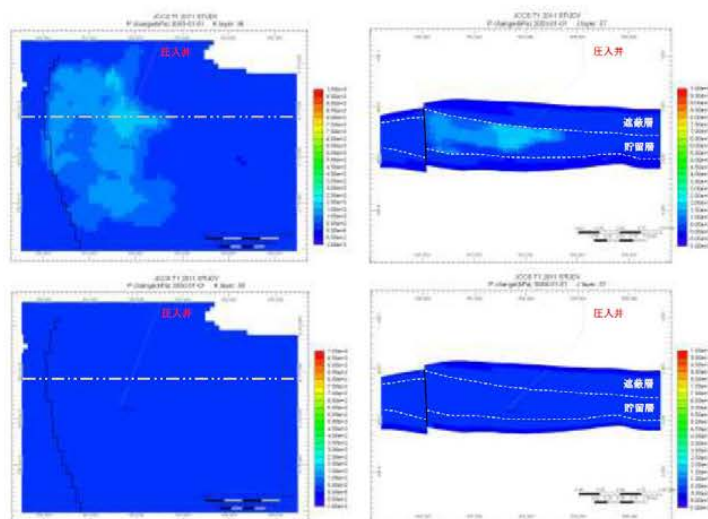


図 3.1-7 CO_2 圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移 (P50 モデル)

(上: 圧入終了時 (3 年後) 下: 50 年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

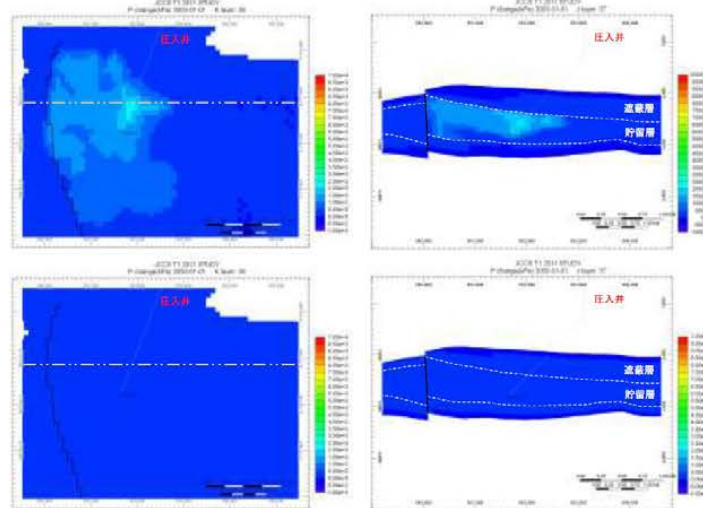


図 3.1-8 CO_2 圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移

(P90 モデル) (上: 圧入終了時 (3 年後) 下: 50 年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

(5) シミュレーションによる貯留CO₂の長期挙動予測

3つの貯留層モデル(P10モデル、P50モデル、P90モデル)について、圧入開始から1,000年間(圧入3年間、圧入終了後997年間)のCO₂の挙動予測シミュレーションを実施した。以下に長期的な挙動に関する各モデルの比較を示す。

① 圧入に伴う貯留層内のCO₂分布予測

圧入終了時点(圧入開始から3年後)、圧入開始から200年後および1,000年後におけるCO₂飽和率分布を図3.1-9～図3.1-11に示す。また、CO₂が地層水に溶解した状態の溶解CO₂濃度の分布を図3.1-12～図3.1-14に示す。

1) P10モデル

CO₂は、高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に選択的に圧入される。圧入されたCO₂は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相^(注)CO₂は圧入井から水平的に約600m先まで、溶解CO₂は約800m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂はほとんど移動せず溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO₂は拡がらない。

注) CO₂は、温度圧力条件により液体と気体の性状を合わせ持った状態となるが、シミュレータの中では「気相」として取り扱われることから、本書では「気相」と称する。

2) P50モデル

CO₂は、比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル同様、圧入されたCO₂は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相CO₂は圧入井から水平的に約450m先まで、溶解CO₂は約700m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂は殆ど移動せず、溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO₂は拡がらない。

3) P90モデル

CO₂は貯留層の比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル、P50モデル同様、圧入されたCO₂は坑井を中心として拡がり、圧入終了時点で気相CO₂は圧入井から水平的に約400m先まで、溶解CO₂は約500m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO₂はほとんど移動せず、溶解によりCO₂飽和率が減少する。溶解

CO₂は、CO₂の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。
遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）へはCO₂は拡がらない。

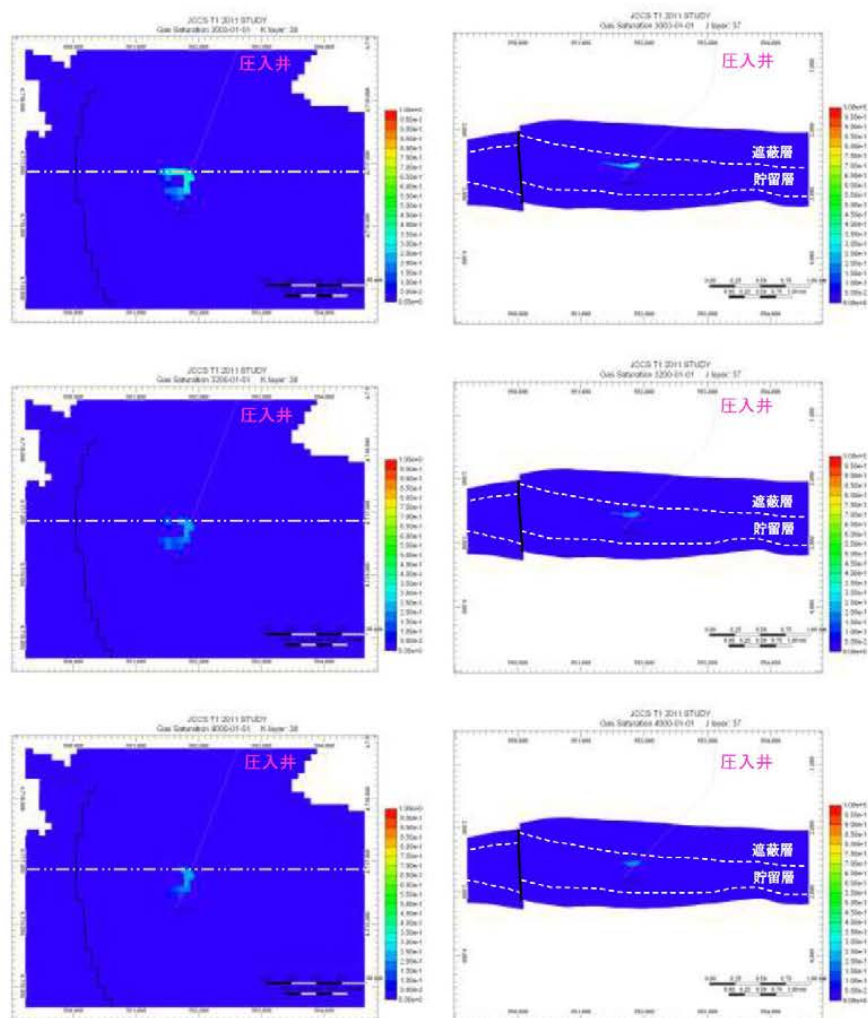


図 3.1-9 P10 モデルにおけるCO₂飽和率の推移

（上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）

（左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

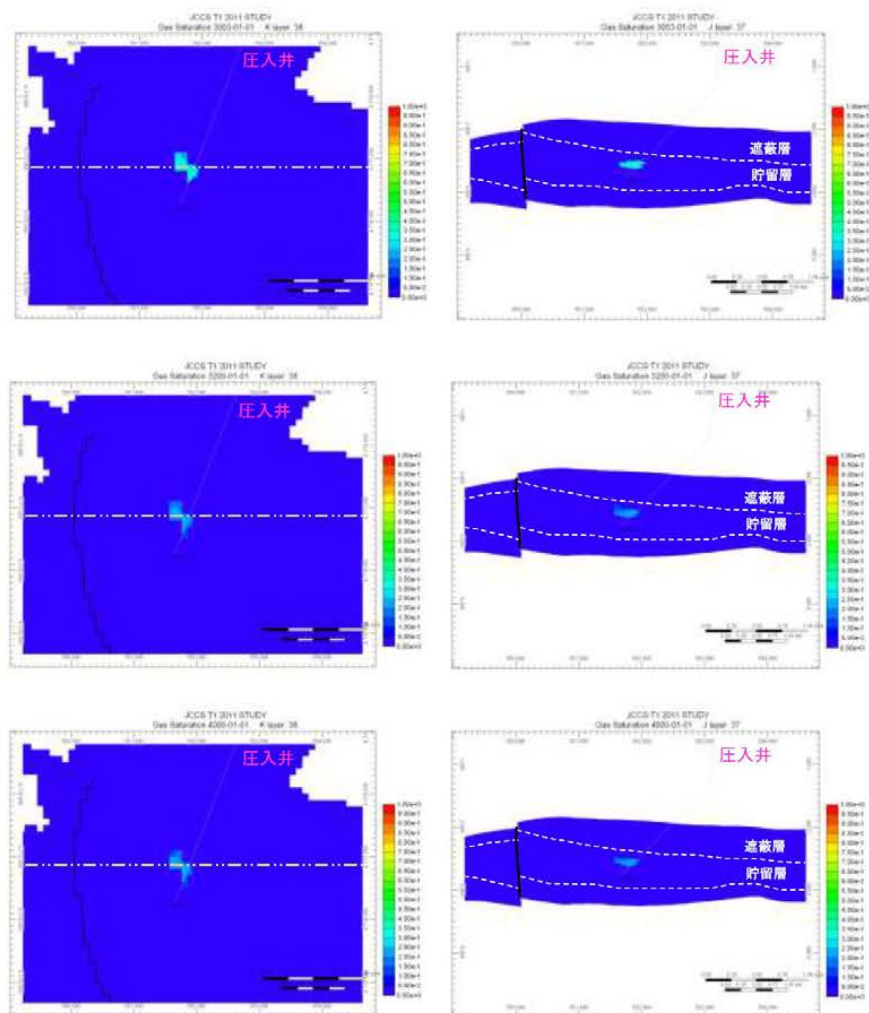


図 3.1-10 P50 モデルにおけるCO₂飽和率の推移

(上：圧入終了時 (3 年後) 中：200 年後 下：1,000 年後)

(左：平面分布 (k 方向セル 38) 右：東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

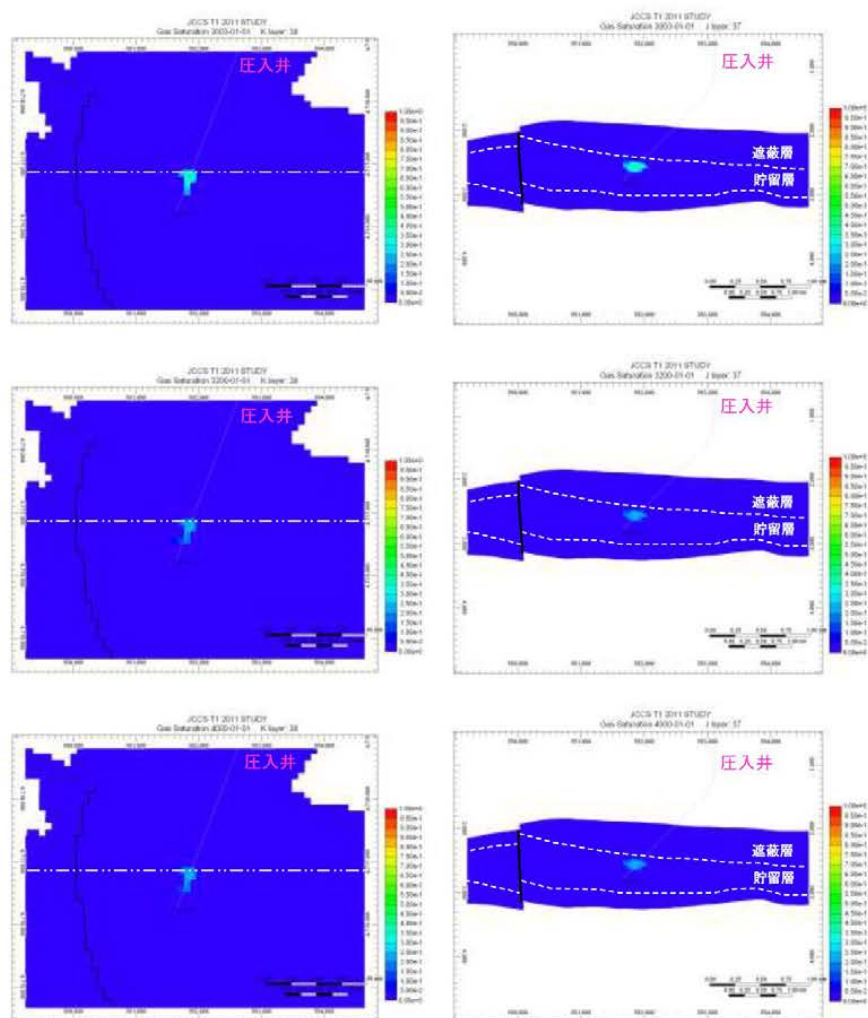


図 3.1-11 P90 モデルにおける CO_2 飽和率の推移

(上：圧入終了時 (3 年後) 中：200 年後 下：1,000 年後)

(左：平面分布 (k 方向セル 38) 右：東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

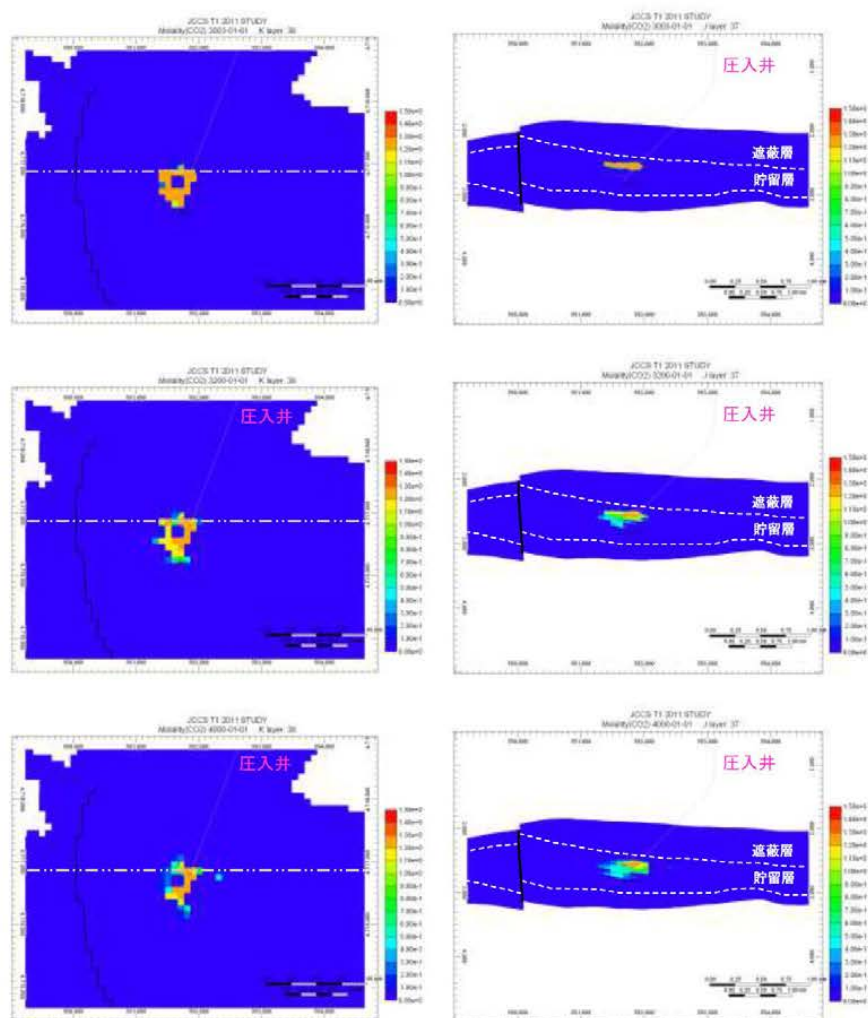


図 3.1-12 P10 モデルにおける溶解 CO_2 濃度 (単位: mol/kg) の推移
 (上: 圧入終了時 (3 年後) 中: 200 年後 下: 1,000 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

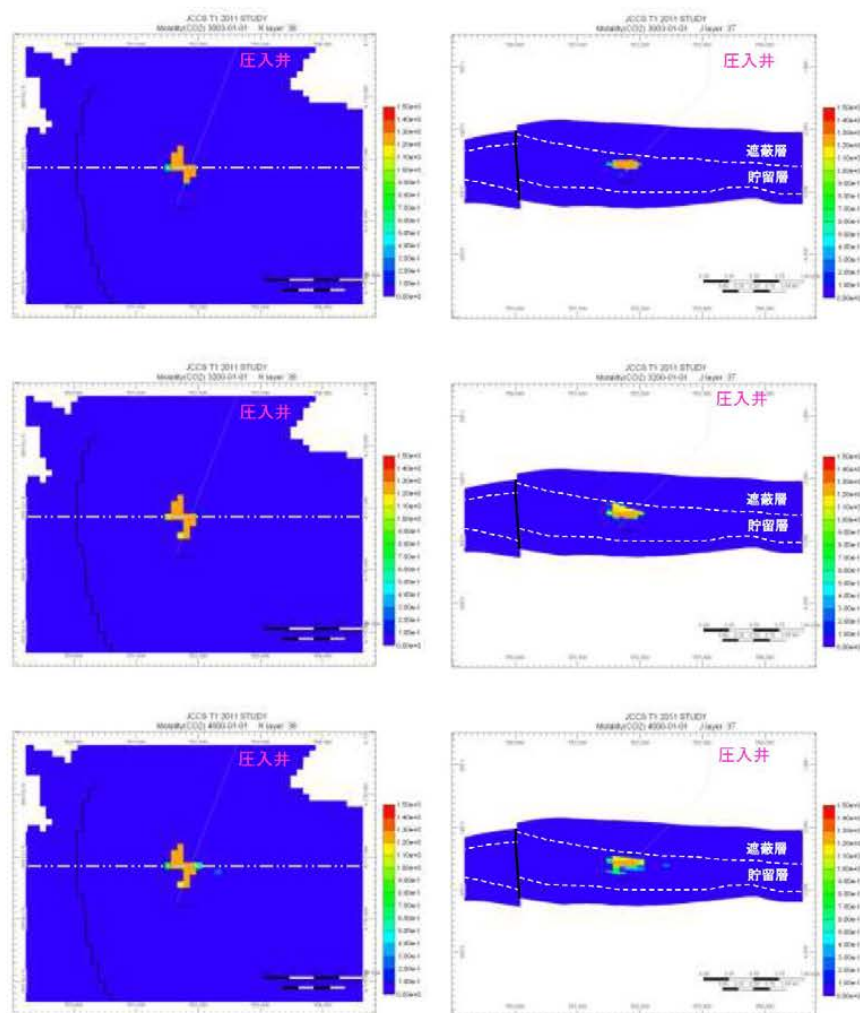


図 3.1-13 P50 モデルにおける溶解 CO_2 濃度（単位：mol/kg）の推移
 （上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

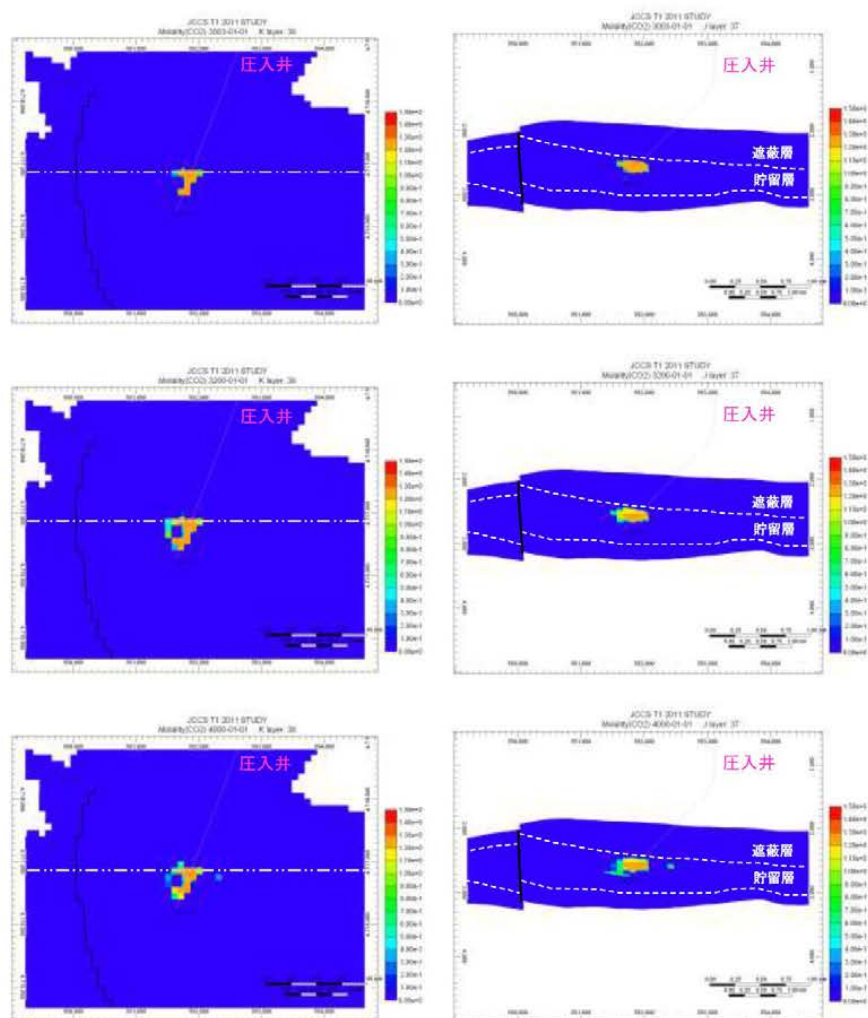
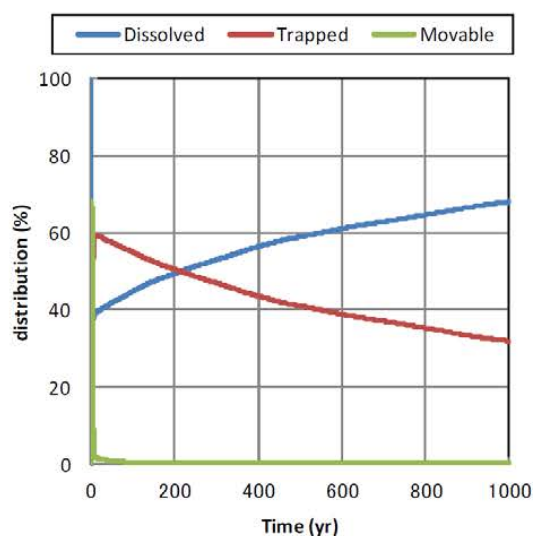


図 3.1-14 P90 モデルにおける溶解 CO_2 濃度（単位：mol/kg）の推移
 （上：圧入終了時（3 年後） 中：200 年後 下：1,000 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

② CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留CO₂の3つの貯留形態を Movable（移動する可能性がある気相CO₂）、Dissolved（溶解CO₂）および Trapped（孔隙などにトラップされ動かない気相CO₂）で表現し、各モデルにおける3種類の貯留形態のCO₂圧入量に対する割合について、その経時変化を図3.1-15～図3.1-17に示す。いずれのモデルにおいても圧入終了後すぐに Movable CO₂量は減少し、約200年でその割合は殆ど0となる。その後、残留ガス飽和率によりトラップされたCO₂が地層水に溶解することで、Trapped CO₂と Dissolved CO₂の割合が変化していく。その割合については、1,000年後にはP10モデルにおいてはDissolved CO₂量が約70%に達するのに対して、P90モデルにおいては約45%となる。この差については、圧入終了までのCO₂の拡がり方による地層水との接触面積の違い、CO₂が溶解し密度が大きくなった地層水の貯留層内での移動のしやすさ、貯留層内の圧力状態が原因であると考えられる。

図 3.1-15 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P10モデル）

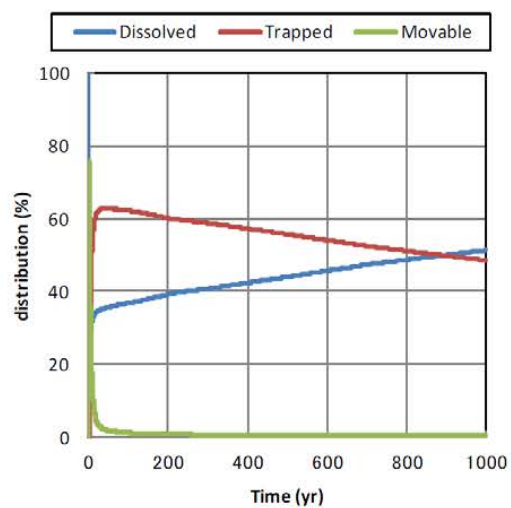


図 3.1-16 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P50 モデル）

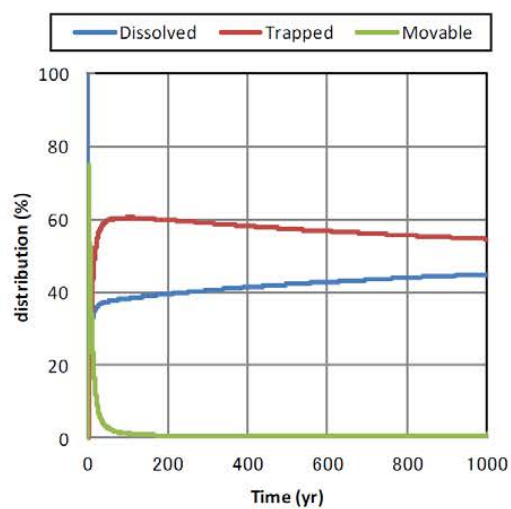


図 3.1-17 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（P90 モデル）

(6) 総合評価

① 滝ノ上層評価のまとめ

滝ノ上層について行った貯留層および遮蔽層の評価ならびに CO_2 挙動予測シミュレーションの結果を以下の記述および表 3.1-2 にまとめる。

- 1) 滝ノ上層は、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。本層の圧入対象層は、溶岩～凝灰角礫岩相と凝灰岩相とに大別され、凝灰岩相では、貯留層としてそれほど良好な性状は期待できないが、溶岩～凝灰角礫岩相では良好な性状が期待できる。
- 2) 滝ノ上層T1部層の上位には、主に泥岩からなる層厚約1,100mの振老層および平取+軽舞層が分布する。調査データから、苫小牧沖構造の西翼を通る断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は良好な遮蔽性能を有する地層であると期待できる。
- 3) 貯留層の性能、遮蔽層の健全性を評価するため、25万トン/年×3年間の CO_2 を圧入し、圧入終了後997年間（圧入開始から1,000年間）の CO_2 挙動を予測するシミュレーション実施した。シミュレーションの結果をまとめると、以下の通りである。
 - ・作成した50個の貯留層モデルの全てにおいて25万トン/年×3年間の圧入は可能であった。
 - ・気相 CO_2 の拡がり圧入終了時点で、圧入井から水平にP10モデルで約600m程度、P50モデルで450m程度、P90モデルで約400m程度であった。
 - ・溶解 CO_2 の拡がり圧入終了時点で、P10モデルで約800m程度、P50モデルで700m程度、P90モデルで約500m程度であった。
 - ・3つのモデルでは遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）への CO_2 の到達は、圧入開始から1,000年後においても確認されなかった。
- 4) 滝ノ上層は堆積岩と比較して不均質性・異方性が高く、掘削後の解析結果から苫小牧CCS-1を掘削した領域は滝ノ上層の高AⅠ（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層の低AⅠ（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

② 総合評価

滝ノ上層への25万トン/年×3年間の CO_2 圧入を行った場合、滝ノ上層への CO_2 の圧入は可能であり、遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）への CO_2 の拡がりはないと評価する。

表 3.1-2 滝ノ上層 T1 部層貯留層総合評価のまとめ

項 目	
貯留層	構造 <ul style="list-style-type: none"> ●北西-南南東に延びる背斜構造(苫小牧沖構造)の北東翼部。 ●圧入想定ポイントから2km程度西側に滝ノ上層下位から荷葉層に達する断層の存在が推定される。
	対象深度・層厚 <ul style="list-style-type: none"> ●垂直深度:約2,400～3,000m ●層厚:約600m
	岩相 <ul style="list-style-type: none"> ●溶岩～凝灰角礫岩、凝灰岩
	物性 圧入対象岩相は滝ノ上層T1部層下部の溶岩～凝灰角礫岩相で孔隙率・浸透率が高いことが期待される岩相。 <ul style="list-style-type: none"> ●孔隙率:5～18%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下), 孔隙率:3～19%(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.68～1.18mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) ●浸透率:0.001～0.01mD(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) ●浸透率:0.002～7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) ●浸透率:0.01mD～2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果)
遮蔽層	圧入・貯留性能 <ul style="list-style-type: none"> ●【貯留層評価】3Dデータなどの解析で良好と想定している岩相を調査井(苫小牧CCS-1)では未確認。 ●【シミュレーション】貯留性能が良好な岩相に圧入することで、25万トン/年×3年圧入可能。
	岩相 <ul style="list-style-type: none"> ●泥岩(振老層～平取・軽舞層)
	層厚 <ul style="list-style-type: none"> ●層厚:約1,100m
	物性 <ul style="list-style-type: none"> ●孔隙率:12.4～18.0%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) ●浸透率:8.2×10⁻⁶～36.7×10⁻⁶mD(苫小牧CCS-1コア試験:水浸透率) ●スレシヨルド圧力:1.29～12.3※MPa以上(苫小牧CCS-1コア試験:N₂-水系残差圧力法) ●スレシヨルド圧力:11.72MPa※以上(苫小牧CCS-1コア試験:CO₂-水系段階昇圧法) ※ブレイクスルーしなかった。 ●リークオフ圧力:45.3MPa(等価泥水比重:1.96)(振老層(苫小牧CCS-1)2,352m)
坑井掘削難易度	遮蔽性能 <ul style="list-style-type: none"> ●【シミュレーション】遮蔽層へのCO₂の到達は確認されなかった。
	大深度の高傾斜井となる。
	圧入後CO ₂ の挙動(シミュレーション結果) <ul style="list-style-type: none"> ●(3年圧入後)気相CO₂の拡がりは400m×600m程度。溶解CO₂は550m×700m程度(P50モデル)。 ●圧入終了後は地層水への溶解等による下方への移動が認められる。 ●200年程度で、気相CO₂の拡がりに変化は見られなくなる。

3.1.2 萌別層評価結果

(1) 貯留層評価

2.8.1 で記載のとおり、萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約 100m である。

萌別層砂岩層は、比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられる。シーケンス層序学という高海水準期堆積体 (HST) に相当し、ファンデルタ・陸棚 (Shelf)・斜面 (Slope) の 3 つに分類できる。少なくとも 5 つファンデルタが北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈した。ファンデルタは北東部を中心に発達し、砂礫岩層は堆積物供給源である北東側がより粗粒で、南西に向かって細粒になる傾向にあると推定した。

以上のことから、ファンデルタと解釈した北東部に存在する砂礫岩層が圧入対象となり得ると考えられる。

(2) 遮蔽層評価

2.8.2 で記載のとおり、萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数 100m の比較的深い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さが分布する。コア試験結果からは水浸透率が $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3}$ mD、スレシヨルド圧力が 0.75MPa、1.65MPa、1.67MPa の結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で 1.50 の強度を確認している。

以上の結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。

(3) シミュレーション概要

① 概要

シミュレータとして GEM (ver. 2010.12) を使用し、CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛管圧力と低浸透性による物理的トラッピング、ガス相対浸透率のヒステリシスによる残留 CO₂トラッピング、CO₂の地層水への溶解による溶解トラッピングである。

第 2 章にて作成した属性モデルにおいて分類した堆積相区分について、シミュレーションモデルでは以下の通り大きく 2 種類に整理し、それぞれに岩相を設定した。

砂岩：堆積相区分4・8・9

泥岩：堆積相区分1・2・3・5・6・7・10

CO₂圧入井（圧入位置）は、萌別層砂岩層を対象としたAIバージョン結果を基に、貯留CO₂の拡がりが三次元弾性波探査の範囲内に留まるようにすることも考慮して、想定する陸上基地からの掘削方位を設定し、仕上げ区間は圧入井の萌別層砂岩層にあたる全区間とした。また、萌別層砂岩層における坑井の最終坑径を8.5インチ（半径0.10795m）、チュービング径を3.5インチ（内半径0.038m）とした。

圧入時に許容される最大坑底圧力については、苫小牧CCS-2の萌別層泥岩層下部のリークオフ圧力が等価泥水比重で1.50であるので、貯留層上限深度でのリークオフ圧力を計算し、その90%を最大坑底圧力とした。すなわち、CO₂圧入井において、グリッドモデルでの貯留層最上位での垂直深度が1,011.93mであることからリークオフ圧力を求め、この90%（13,410kPa）をCO₂圧入時に許容される最大坑底圧力とした。

シミュレーションでは、CO₂の圧入目標量を25万トン/年×3年として、表3.1-4で示す各ケースに対してシミュレーションを実施した。

② パラメータ

シミュレーションパラメータは苫小牧CCS-1および苫小牧CCS-2で得られたデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等）および文献値により表3.1-3に示す値を用いた。

表 3.1-3 萌別層砂岩層 シミュレーションパラメータ

モデル	萌別層砂岩層 2011 モデル	
サイズ	8km×15km×1,500m	
グリッド	40×75×43 Grid	
アクティブ・ブロック数	97,024	
基準温度	44.78℃ (1,046.835 mVD)	
基準圧力	10,669.4kPa (1,046.835mVD)	
CO ₂ 圧入レート、圧入期間	250,000 トン/年×3 年	
圧入圧力上限	13,410kPa	
帯水層容積 (面積×層厚×孔隙率)	49×10 ⁹ Rm ³	
岩石性状	砂岩	泥岩
平均孔隙率	0.281	0.342
平均浸透率 (mD)	17.0	0.00173
圧縮率 (kPa ⁻¹)	1.532×10 ⁻⁶ 測定値	
塩分濃度 (ppm NaCl)	18,000 (Cl ⁻ =10,350mg/L)	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 K _{rg}	測定値	Corey (1954) ¹⁾
液相 相対浸透率 K _{rw}	測定値	van Genuchten (1980) ²⁾
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.05	0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.49 測定値	0.638 Bennion (2007) ³⁾
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.275 Holtz (2002) ⁴⁾	—
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	van Genuchten (1980) ²⁾	
P _c (kPa)	4.04	750

【参考文献】

- 1) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly*, November, 38-41.
- 2) van Genuchten, M. Th., 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- 3) Bennion, D.B., 2007, Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO₂-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks: *paper SPE 106995-MS*.
- 4) Holtz, M. H., 2002, Residual Gas Saturation to Aquifer Influx : A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction: *paper SPE 75502*.

③ ケーススタディ

以下のケーススタディを実施し、各パラメータがシミュレーションの結果に与える影響を検討した。各ケースの概要を表 3. 1-4 にまとめる。

a ベースケース (表 3. 1-4 におけるケース①)

水平浸透率は苫小牧 CCS-1 圧入テストにおける圧力解析結果 (No. 3 圧入テスト: 25mD, No. 3a 圧入テスト: 9mD) の平均値 $k_v=17\text{mD}$ をベースケースにおける水平浸透率 (k_h) として設定した。垂直浸透率は水平浸透率の 1/10 ($k_v/k_h=0.1$) として設定した。

b 砂岩層の浸透率の影響 (表 3. 1-4 におけるケース②～④)

砂岩の浸透率 (水平浸透率) について浸透率に振れ幅があった場合の圧入挙動について把握することを目的として、ベースケースに対して、高浸透率ケース ($k_h=25\text{mD}$) および低浸透率ケース ($k_h=9\text{mD}$) として検討した。

水平浸透率/垂直浸透率 (k_v/k_h) 比についても、ベースケースの 0.1 に対して圧入テストにおける解析結果の平均値 ($k_v/k_h=0.675$: $k_v=11.475\text{mD}$) を与えることでその影響について検討した。

c 遮蔽層性状の影響 (表 3. 1-4 におけるケース⑤)

遮蔽層性状が劣る場合の CO₂ 挙動を把握することを目的として、苫小牧 CCS-2 コア試料の残差圧力測定 (N₂-水系) で正しい測定ができなかった試料の測定値 (著しく低い測定値) を使用し、水浸透率がベースケースより高く ($k_w=7\times 10^{-3}\text{mD}$)、スレシヨルド圧力が極端に低い ($P_c(\text{CO}_2)=0.012\text{MPa}$ (水-N₂系スレシヨルド圧力: $P_c(\text{N}_2)$ 系 $=0.028\text{MPa}$ から換算)) ケースを想定して検討した。

d 萌別層砂岩層上限の変更 (表 3. 1-4 におけるケース⑥)

図 2. 8-4 に示すように、ベースケースにおいて堆積相区分 5 (萌別層下部 TST-陸側下部) については、堆積相解釈において対象地域全体に広がっていると仮定しているため、本来、砂礫岩層である堆積相区分 4 に CO₂ は移動することはない。しかしながら、もし何らかの理由で堆積相区分 4 にも CO₂ が貯留された場合にどのような挙動を見せるかを

把握するために、堆積相区分4のトップが萌別層砂岩層トップとなるように本来は泥岩からなる堆積相区分5に砂岩のパラメータを設定したシミュレーションを実施した。

ただし、堆積相区分4、5は圧入対象とはしないため、パーフォレーションを設定せず、圧入圧力の上限もベースケースなど他のケースと同様にした。

e 帯水層容積の影響（表3.1-4におけるケース⑦）

周辺部を含めた既存地質データから、萌別層砂岩層は、地質モデル構築範囲外側への拡がりが確認されている。ケース①～⑥では、外側の帯水層容積についても外周部セルの孔隙容積に反映させている。ケース⑦では帯水層容積を、貯留層の分布域が3Dデータの範囲内に限られるケース（シミュレーションモデルの外周グリッドのVolume Modifyを行わない）を想定した。

表 3.1-4 ケーススタディにおいて使用した各岩相に与えたパラメータ

ケース名	砂岩相				泥岩相				帯水層容積 (Rm) ³
	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	垂直浸透率/ 水平浸透率	堆積相	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	スロット圧力 (MPa)	堆積相	
①ベースケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49 × 10 ⁹
②低浸透率	9	0.9	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49 × 10 ⁹
③高浸透率	25	2.5	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49 × 10 ⁹
④高kv/kh	17	11.475	0.675	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49 × 10 ⁹
⑤遮蔽性能 (低)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.007	0.012	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49 × 10 ⁹
⑥前別層砂岩層上層変更	17	1.7	0.1	4, 5, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 6, 7, 10	49 × 10 ⁹
⑦帯水層容積 (小)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	3 × 10 ⁹

(4) シミュレーションによるCO₂の圧入挙動

上述の7ケースについて25万トン/年の圧入レートで3年間(75万トン)の挙動予測シミュレーションを行ったところ、ベースケースおよび高浸透率ケースにおいて25万トン/年×3年間の圧入が可能であることを確認した。

低浸透率ケースでは、圧入開始後、坑底圧力(貯留層上限深度での坑内圧力)がすぐに圧入圧力の上限(約13.4MPa)に達することから、圧入レートを14~16万トン/年に減少せざるをえなくなり、その結果、累計圧入量が45.2万トンであった。

以上の通り、貯留可能性に影響を与える要因が水平浸透率であることから、本項では水平浸透率が異なるケースのCO₂圧入挙動について述べる。

① CO₂圧入時の挙動

a ベースケース

図3.1-18にベースケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。想定圧入レートおよび期間である25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO₂を圧入可能であることを確認した。ベースケースでは、坑底圧力が、圧入圧力上限(13.4MPa)以下で圧入することができ、圧入終了時点での坑底圧力は13.2MPaとなった。圧入終了後に坑内圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.6MPaとなり、以後ゆっくりと圧入前の地層圧(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

b 低浸透率ケース

図3.1-19に低浸透率ケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。低浸透率ケースでは、圧入開始後すぐに坑底圧が圧入圧力上限(13.4MPa)に達して、圧入レートが11~16万トン/年、累計圧入量が45.2万トンとなった。ベースケースと同様に圧入終了後に坑底圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.7MPa程度となり、以後ゆっくりと圧入前の圧力(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

c 高浸透率ケース

図3.1-20に高浸透率ケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。想定圧入レートおよび期間である25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO₂を圧入可能であることを確認した。高浸透率ケースでは坑底圧力が、圧入圧力上限(13.4MPa)以下の圧力で圧入することができ、圧入終了時点では12.5MPaとなった。他のケースと同様に坑底圧力は圧入終了後に圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.6MPa程度となり、以後ゆっくりと圧入前の圧力(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

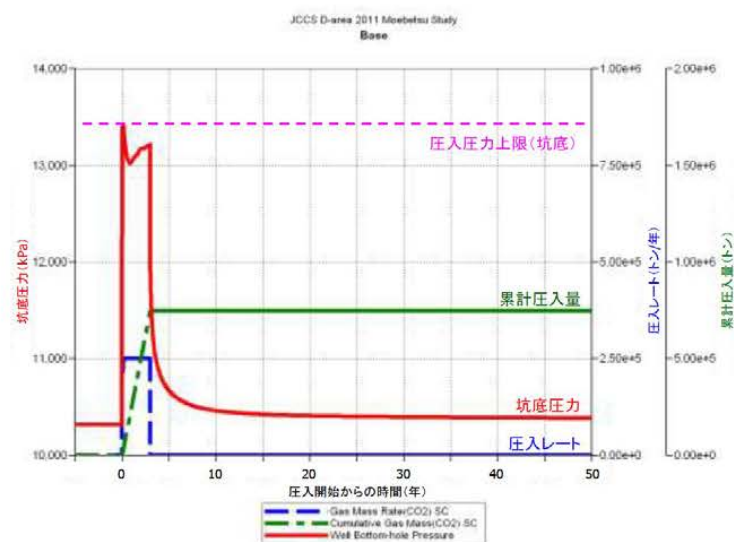


図 3.1-18 ベースケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

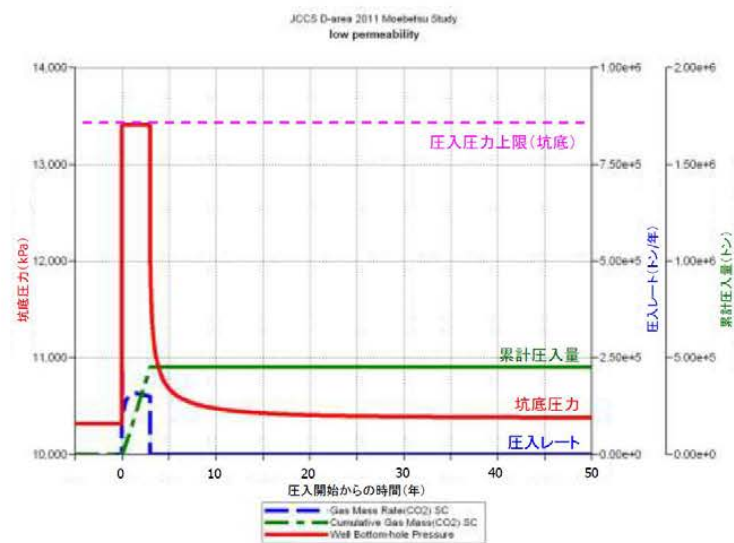


図 3.1-19 低浸透率ケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

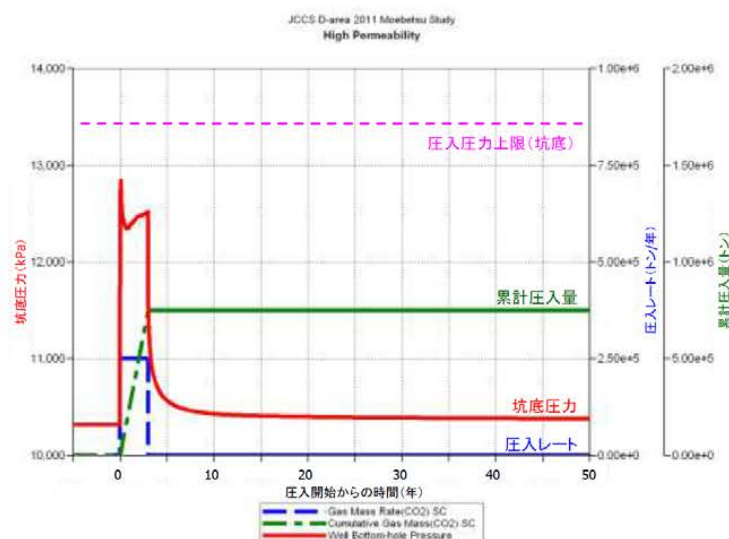


図 3.1-20 高浸透率ケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

② 貯留層の圧力分布

a ベースケース

図 3.1-21 にベースケースにおける圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 800m、東西約 800m の範囲に 1,000kPa（圧入前の地層圧の約 10%）以上に上昇した領域が、南北に約 6km、東西約 6km の範囲に 100kPa（圧入前の地層圧の約 1%）以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

b 低浸透率ケース

図 3.1-22 に低浸透率ケースにおける圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 600m、東西約 400m の範囲に 1,000kPa（圧入前の地層圧の約 10%）以上に上昇した領域が、南北に約 4km、東西約 4km の範囲に 100kPa（圧入前の地層圧の約 1%）以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

c 高浸透率ケース

図 3.1-23 に圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 800m、東西約 800m の範囲に 1,000kPa（圧入前の地層圧の約 10%）以上に上昇した領域が、南北に約 6.5km、東西約 4km の範囲に 100kPa（圧入前の地層圧の約 1%）以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

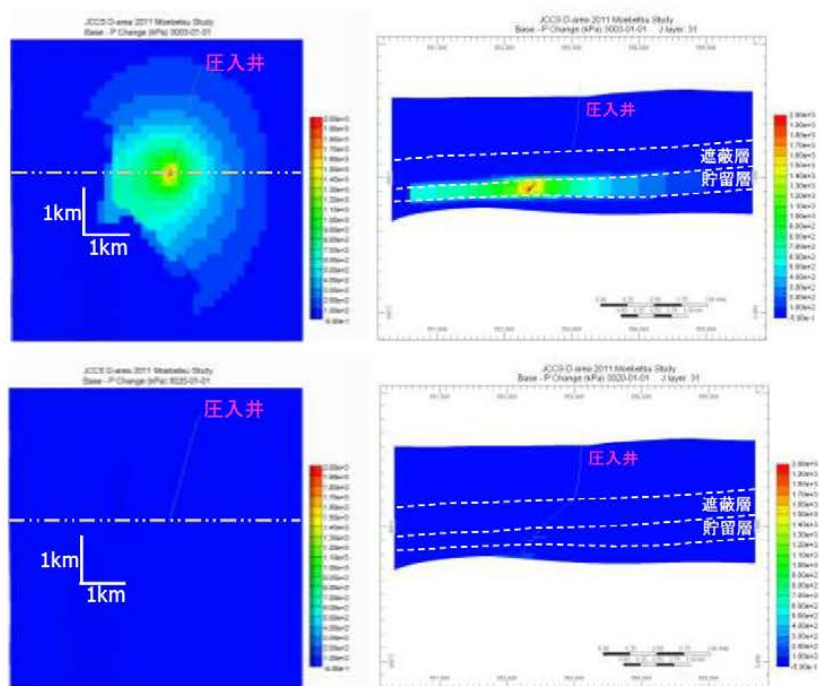


図 3.1-21 CO_2 圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移 (ベースケース)
 (上: 3 年後 下: 20 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

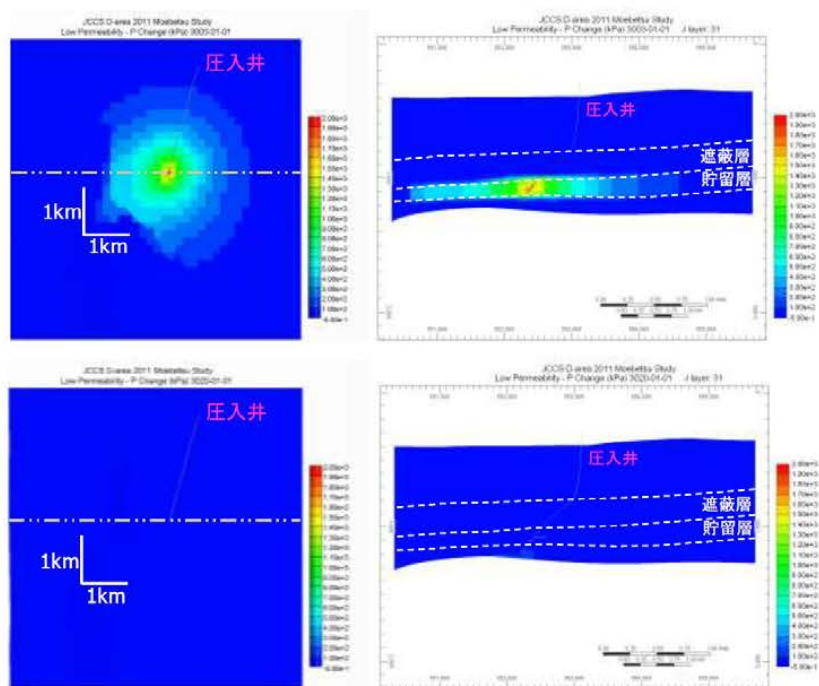


図 3.1-22 CO₂圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（低浸透率ケース）
 （上：3年後 下：20年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

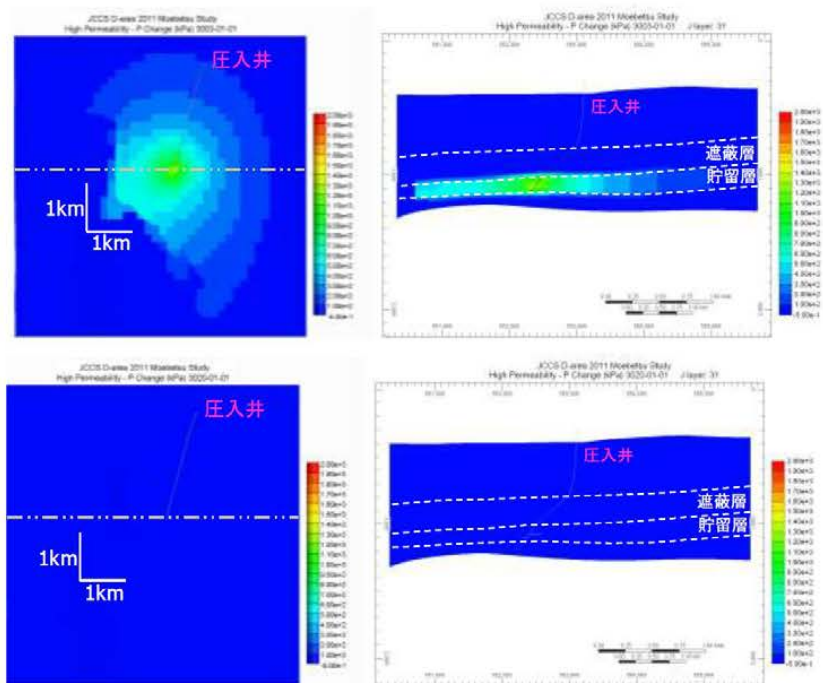


図 3.1-23 CO_2 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（高浸透率ケース）
 （上：3 年後 下：20 年後）
 （左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

(5) シミュレーションによる貯留CO₂の長期挙動予測

① 圧入に伴う貯留層内のCO₂分布予測

圧入終了時点（圧入開始から3年後）、圧入開始から200年後および1,000年後における気相のCO₂飽和率分布を図3.1-24～図3.1-26に示す。また、CO₂が地層水に溶解した状態の溶解CO₂濃度の分布を図3.1-27～図3.1-29に示す。

a ベースケース

気相CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに飽和率の高い範囲が広がっている。同様に、溶解CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mの範囲に広がっている。その後、CO₂は水平方向にはほとんど動かなくなるが、貯留層内での上方への移動があり、遮蔽層下限までの移動が見られる。20年後以降、1,000年後まではほとんど動かなかった。一方で、溶解CO₂は1,000年後まで主に垂直方向に広がった。

b 低浸透率ケース

気相CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約200m、南北約200mに飽和率の高い範囲が広がっている。一方、溶解CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに広がっている。その後、CO₂は1,000年後までほとんど動かなかった。溶解CO₂は1,000年後まで拡がり続けた。

c 高浸透率ケース

気相CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに飽和率の高い範囲が広がっている。一方、溶解CO₂は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約600m、南北約800mに広がっている。その後、CO₂は水平方向にはほとんど動かなくなるが、貯留層内での上方への移動があり、遮蔽層下限までの移動が見られる。20年後以降、1,000年後まではほとんど動かなかった。一方で、溶解CO₂は1,000年後まで主に垂直方向に広がった。

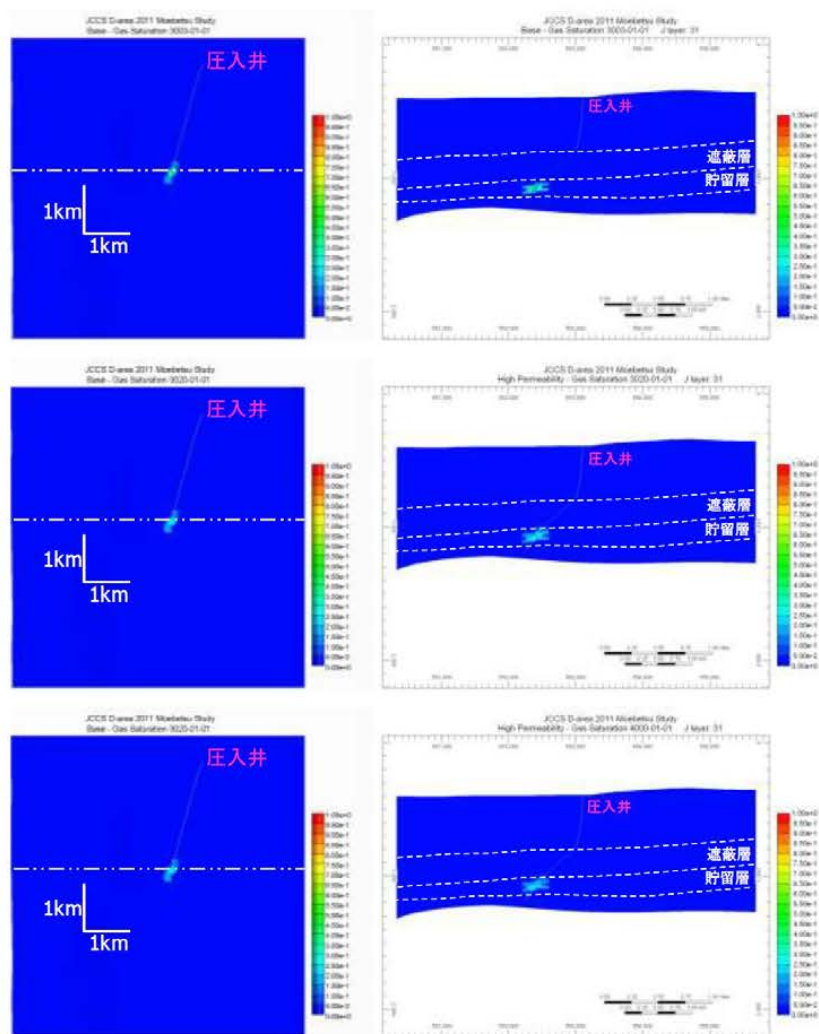


図 3.1-24 CO₂飽和率の推移（ベースケース）

（上：3年後 中：20年後 下：1,000年後）

（左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

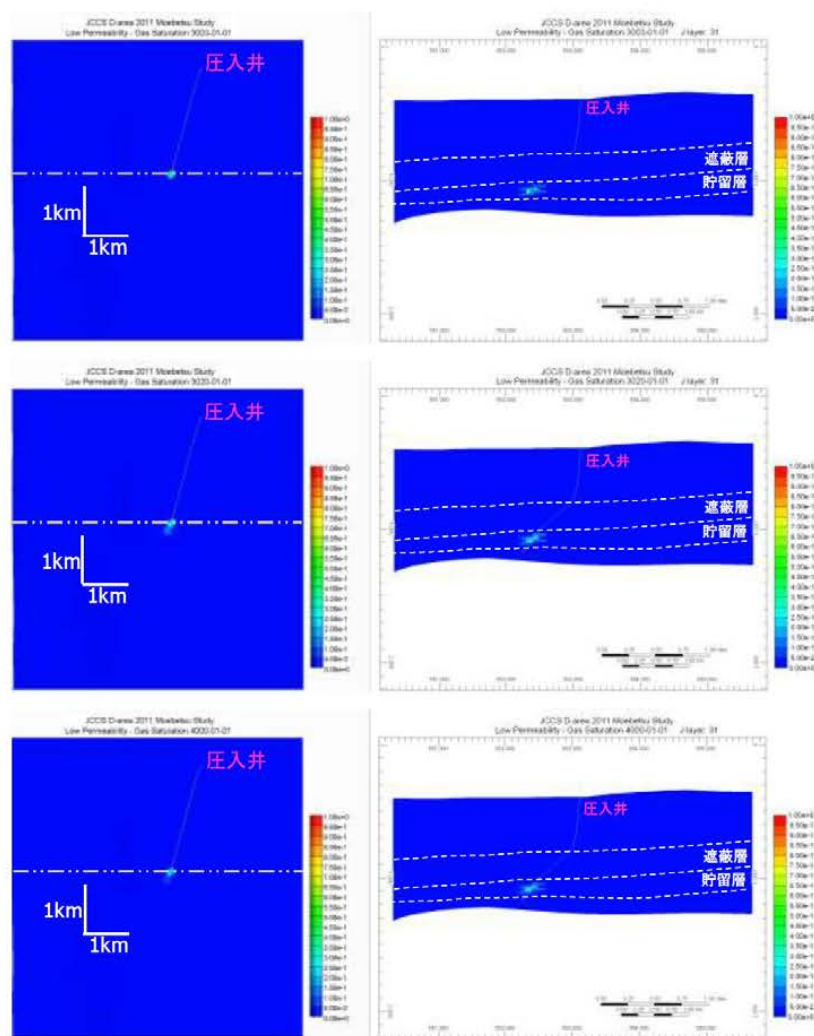


図 3.1-25 CO_2 飽和率の推移（低浸透率ケース）

（上：3年後 中：20年後 下：1,000年後）

（左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

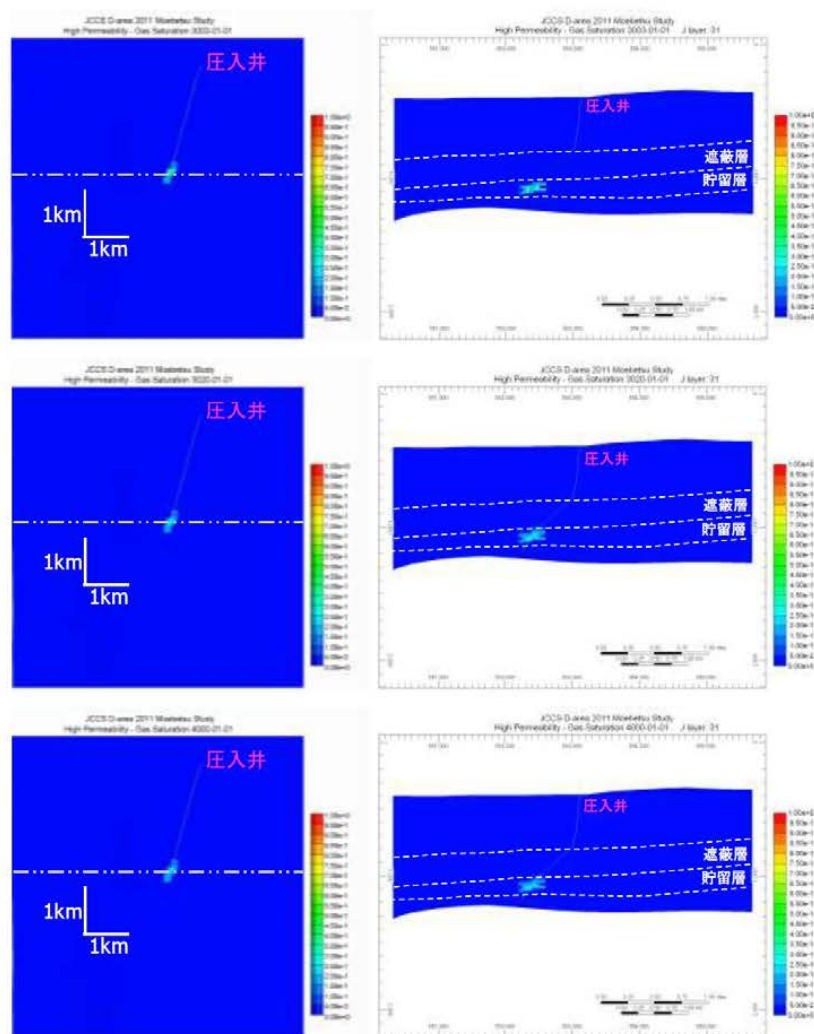


図 3.1-26 CO₂飽和率の推移（高浸透率ケース）

（上：3年後 中：20年後 下：1,000年後）

（左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線的位置））

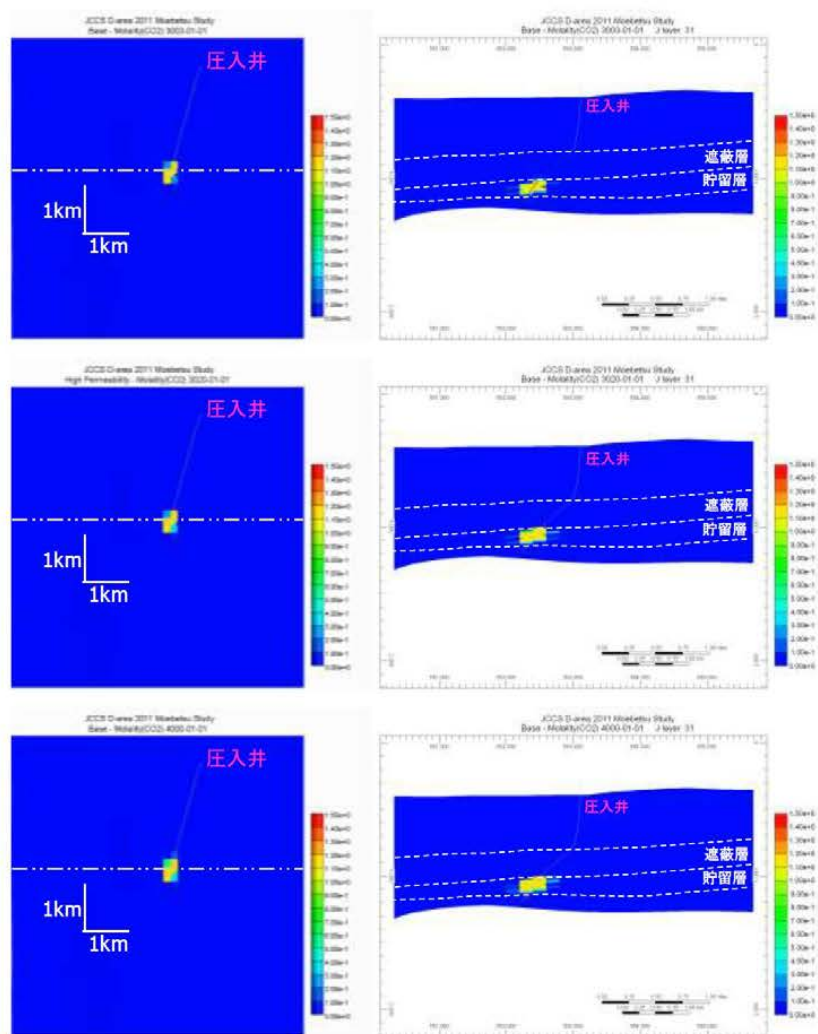


図 3.1-27 溶解 CO_2 濃度 (単位: mol/kg) の推移 (ベースケース)
 (上: 3 年後 中: 20 年後 下: 1,000 年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

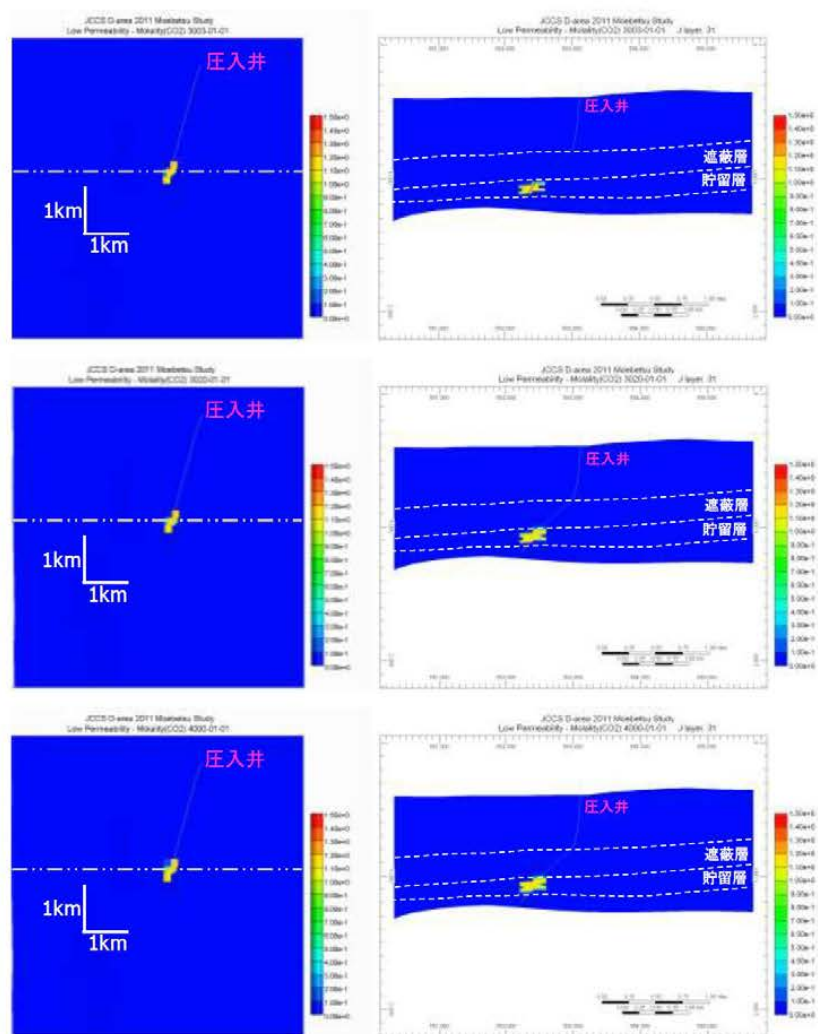


図 3.1-28 溶解CO₂濃度 (単位: mol/kg) の推移 (低浸透率ケース)
 (上: 3年後 中: 20年後 下: 1,000年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

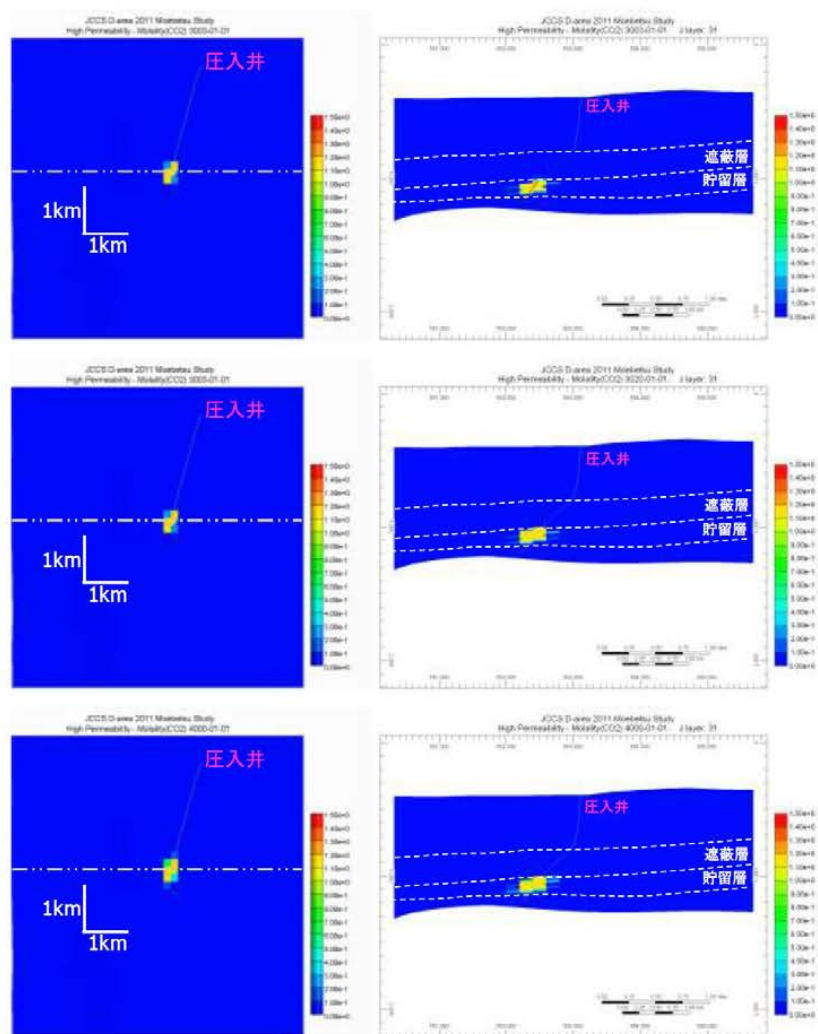


図 3.1-29 溶解CO₂濃度 (単位: mol/kg) の推移 (高浸透率ケース)
 (上: 3年後 中: 20年後 下: 1,000年後)
 (左: 平面分布 (k 方向セル 28) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

② 遮蔽性能検討

遮蔽性能の評価の一環として、遮蔽層と貯留層の境界付近の鉛直に並んだ3つのセルにおける CO_2 飽和率と溶解 CO_2 濃度を精査した。遮蔽層と貯留層の境界で最も圧力が高くなる箇所は圧入井が通るセルであることから、このセルを選択し、貯留層上限のセル（堆積相区分8）を貯留層C、その直上の遮蔽層下限のセル（堆積相区分5）を遮蔽層B、さらにその直上の遮蔽層のセル（堆積相区分4）を遮蔽層Aとする（上位から遮蔽層A、遮蔽層B、貯留層Cの順、図2.8-6および図3.1-30）。

コア試料の分析結果では、堆積相区分2（遮蔽層Aよりも上部の泥岩）ではスレシヨルド圧力0.75MPa、遮蔽層Bではスレシヨルド圧力1.65～1.67MPaが得られている。圧入終了時における貯留層上限での圧力（貯留層C：12.1MPa）が、圧入終了時における遮蔽層下限の圧力（遮蔽層B：10.9MPa）にスレシヨルド圧力（1.65MPa）を加えた圧力（12.55MPa）を超えていないことを確認した（図3.1-31）。

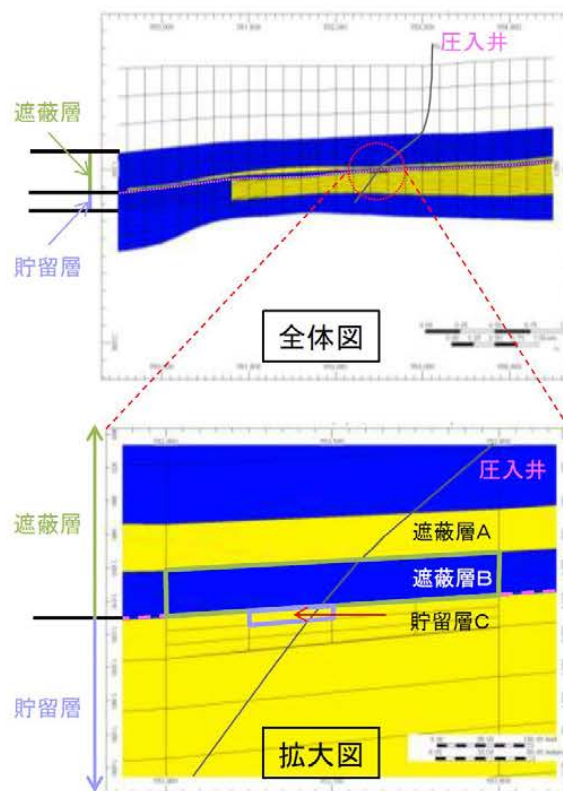


図 3.1-30 萌別層の地質モデル断面図（黄色：砂岩 青色：泥岩）

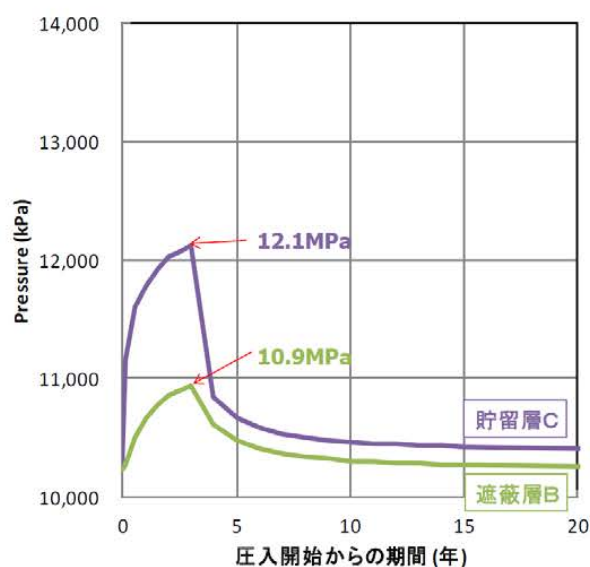


図 3.1-31 遮蔽層Bと貯留層Cの圧力の時間変化

なお、シミュレーションにおけるスレシヨルド圧力については、より安全サイドの設定としてコア試験で得られている最低値（0.75MPa）を採用して遮蔽性能の検討を行った。

a ベースケース

図 3.1-32 にベースケースにおけるそれらのセルのCO₂飽和率および溶解CO₂濃度の時間変化を示す。

圧入中は、遮蔽層Bと貯留層Cのセルの圧力差（約1.2MPa）が遮蔽層Bに設定したスレシヨルド圧力（0.75MPa）を越えるために、貯留層Cから遮蔽層BへCO₂の流れがあるが、遮蔽層BにおけるCO₂飽和率はほとんど変化がなかった。

一方で、遮蔽層Bにおける溶解CO₂濃度は、圧入開始1,000年後に0.16mol/kg-地層水だけ増加していた。さらに、遮蔽層Aの溶解CO₂濃度は圧入開始1,000年後でも 3.4×10^{-4} mol/kg-地層水と非常に低かった。

また、遮蔽層である泥岩は 1.73×10^{-3} mdの非常に小さい浸透率を有している。

以上のことから、ベースケースにおいては圧入中にCO₂が貯留層から遮蔽層へとわずかに移動するが、泥岩内の水に溶解して安定した状態となる。したがって、萌別層泥岩層は、所定量のCO₂を貯留層するのに十分な遮蔽性能を有していると判断する。

b 遮蔽性能（低）ケース（表 3.1-4 の⑤）

遮蔽層性状が劣る場合の CO_2 挙動を評価した。スレシヨルド圧力を 0.012MPa、水平浸透率を $7 \times 10^{-3} \text{mD}$ とベースケースよりも遮蔽層性状としては劣る値を設定した。

ベースケースと同様に、遮蔽層と貯留層の境界付近の鉛直に並んだ 3 つのセルにおける CO_2 飽和率と溶解 CO_2 濃度を精査した。図 3.1-33 にそれらのセルの CO_2 飽和率および溶解 CO_2 濃度の時間変化を示す。ベースケースと同様に遮蔽層 A と遮蔽層 B における CO_2 飽和率はほとんど変化がなかった。

一方で、遮蔽層 B における溶解 CO_2 濃度は 0.55mol/kg -地層水（圧入開始 1,000 年後）とベースケースより多くなった。また、遮蔽層 A の溶解 CO_2 濃度は圧入開始 1,000 年後で $2.6 \times 10^{-3} \text{mol/kg}$ -地層水と非常に低かった。

以上のことから、遮蔽性能が極端に劣るケースを想定した場合でもベースケースと同様に遮蔽層内の水に溶解した CO_2 濃度のわずかな上昇は認められるが、溶解して安定した状態であることがわかった。

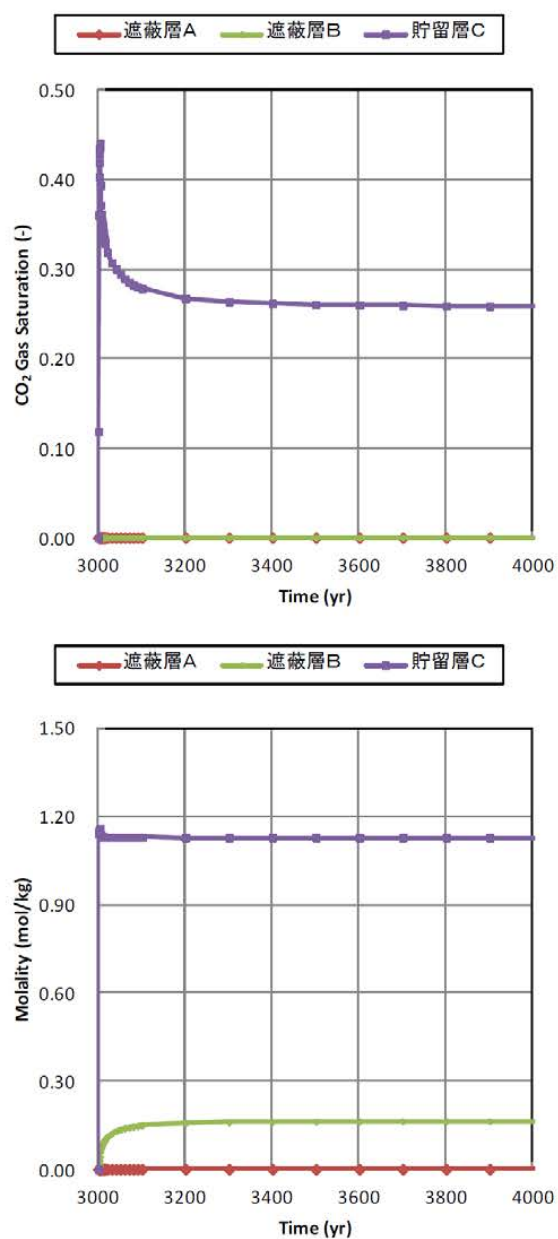


図 3.1-32 遮蔽層・貯留層境界付近でのCO₂飽和率と溶解CO₂濃度の時間変化
(ベースケース) (上: CO₂飽和率 下: 溶解CO₂濃度)
(上位から遮蔽層A、遮蔽層B、貯留層Cの順)

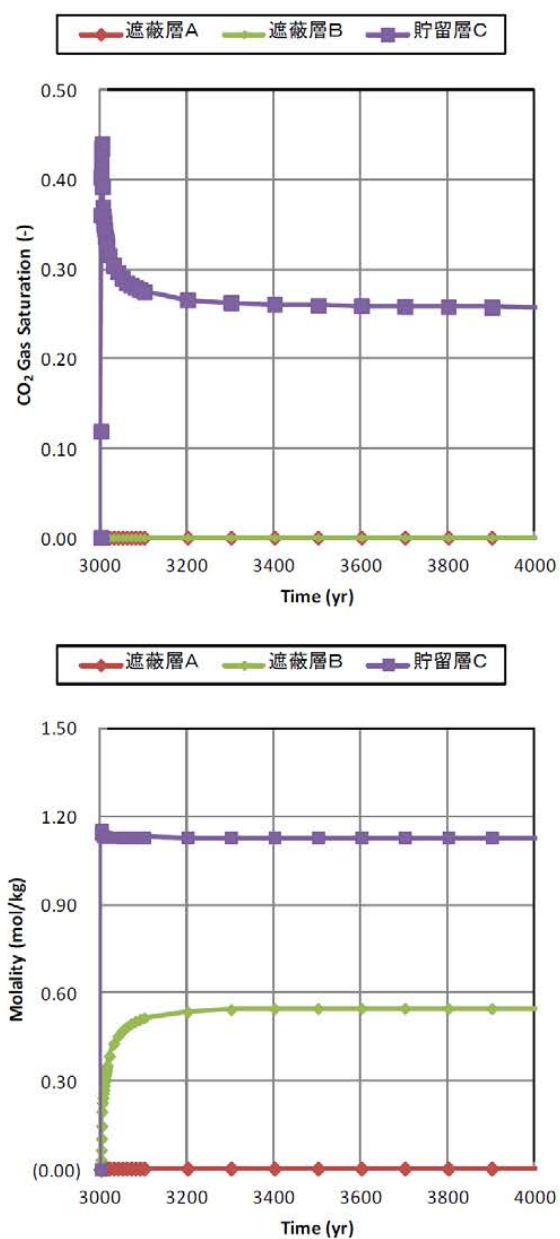


図 3.1-33 遮蔽層・貯留層境界付近でのCO₂飽和率と溶解CO₂濃度の時間変化
 (遮蔽性能(低)ケース) (上: CO₂飽和率 下: 溶解CO₂濃度)
 (上位から遮蔽層A、遮蔽層B、貯留層Cの順)

③ CO₂の貯留形態ごとの割合

貯留CO₂の3つの貯留形態をMovable、DissolvedおよびTrappedで表現し、各ケースにおける割合について、その経時変化を図3.1-34～図3.1-36に示す。

いずれのケースにおいても圧入終了後すぐにMovable CO₂量は減少し、約50年でその割合は9～10%程度となり、さらに減少を続けていく。また、Trapped CO₂とDissolved CO₂の割合はゆっくりと変化していく。その割合については、圧入開始後1,000年後においては、ベースケースではDissolved CO₂量は約44%、Trapped CO₂は約55%、低浸透率ケースではDissolved CO₂は48%、Trapped CO₂は49%、高浸透率ケースではDissolved CO₂は45%、Trapped CO₂は54%という割合になった。この差については、圧入終了までのCO₂の拡がり方による地層水との接触面積の違い、CO₂が溶解し密度が大きくなった地層水の貯留層内での移動のしやすさ、貯留層内の圧力状態が原因であると考えられる。

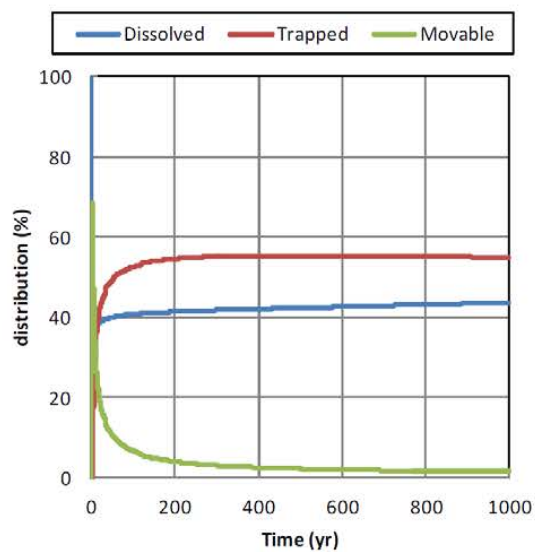


図 3.1-34 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（ベースケース）

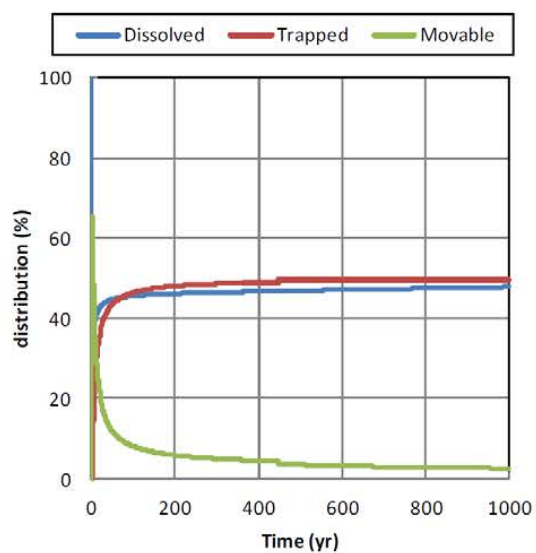


図 3.1-35 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（低浸透率ケース）

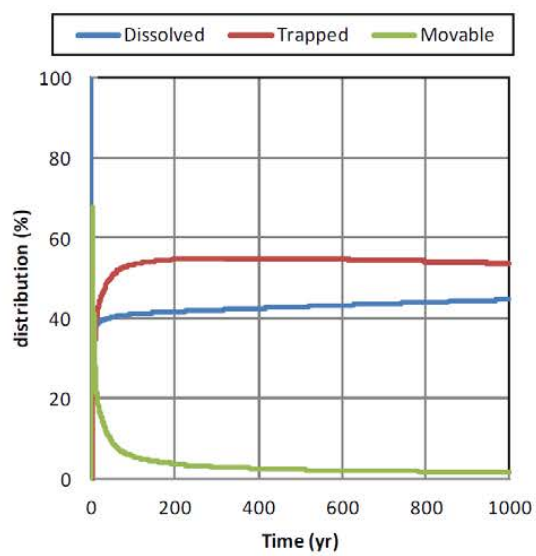


図 3.1-36 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（高浸透率ケース）

(6) 総合評価

① 萌別層評価のまとめ

萌別層砂岩層について行った貯留層評価、遮蔽層評価、 CO_2 挙動予測シミュレーションの結果を以下の記述および表 3.1-5 にまとめる。

- 1) 萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタからなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜で安定的に堆積し、層厚は約 100m である。砂礫岩相は北東部を中心に発達していると解釈される。
- 2) 萌別層泥岩層は、下位の萌別層砂岩層の上位に安定して堆積し、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さがあり良好な遮蔽性能が期待される。
- 3) 貯留層の性能、遮蔽層の性能を評価するため、25 万トン/年×3 年間の CO_2 を圧入し、圧入終了後 997 年間（圧入開始から 1,000 年間）の CO_2 挙動を予測するシミュレーション実施した。
- 4) シミュレーションの結果をまとめると、以下の通りである。
 - ・7 つのケース中 6 ケースで 25 万トン/年×3 年間（累計圧入量：75 万トン）の圧入は可能であった。層内の浸透率を 9ml とした低浸透率ケースでは 3 年間で累計圧入量が 45.2 万トン（平均 15 万トン/年）であった。浸透率が低い場合においても萌別層における最少想定圧入レートの 10 万トン/年での圧入が可能であることを確認した。
 - ・気相 CO_2 の拡がり圧入井近傍において水平方向に東西 400m 程度、南北 600m 程度までであり、溶解 CO_2 の拡がり東西 400m 程度、南北 600m 程度までであった。
 - ・遮蔽層（萌別層泥岩層）へは遮蔽層の下限のセルには溶解 CO_2 の状態で CO_2 は存在するが、それより上位へは移動していなかった。
 - ・圧入終了時における貯留層上限での圧力（12.1MPa）が、圧入終了時における遮蔽層下限の圧力（10.9MPa）にスレシヨルド圧力（1.65MPa）を加えた圧力（12.55MPa）を超えていないことを確認した。

② 総合評価

萌別層砂岩層への最少想定圧入レートである 10 万トン/年×3 年間の CO_2 圧入は可能であり、遮蔽層（萌別層泥岩層）への CO_2 の拡がりもないと評価する。

表 3.1-5 萌別層砂岩層貯留層総合評価のまとめ

項 目	
貯留層	構造 ● 緩やかな北西傾斜(1~3°)の単斜構造
	対象深度・層厚 ● 垂直深度: 約1,100~1,200m ● 層厚: 約100m
	岩相 ● 砂岩主体(礫質砂岩、シルト岩を伴うファンデルタ堆積物)
	物性 ● 孔隙率: 25~40%(苫小牧CCS-2コア試験: 封圧下), 孔隙率: 20~40%(物理検層解析結果) ● 浸透率: 9~25mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) ● 浸透率: 1~1,000mD(苫小牧CCS-2コア試験: 封圧下、空気) ● 浸透率: 1~120mD(物理検層解析結果)
	圧入・貯留性能 ● 【苫小牧CCS-1圧入テスト】最大1,200kl/日(掘削深度1,077~1,217mのうち57.5m) ● 【シミュレーション】25万トン/年×3年間圧入可能(低浸透率ケースを除く)
遮蔽層	岩相 ● シルト岩~泥岩(萌別層上部)
	層厚 ● 層厚: 約200m
	物性 ● 孔隙率: 32.4~37.2%(苫小牧CCS-2コア試験: 封圧下) ● 浸透率: $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3}$ mD(苫小牧CCS-2コア試験: 水浸透率) ● リークオフ圧力: 14.6MPa(等価泥水比重: 1.50)(萌別層泥岩層(苫小牧CCS-2)991m) ● スレシヨルド圧力: 0.75, 1.65, 1.67MPa(苫小牧CCS-2コア試験: CO ₂ -水系)
	遮蔽性能 ● 【シミュレーション】圧入終了時における貯留層上限での圧力(12.1MPa)が、圧入終了時における遮蔽層下限の圧力(10.9MPa)にスレシヨルド圧力(1.65MPa)を加えた圧力(12.55MPa)を超えていないことを確認した。
	坑井掘削難易度 ● 軟弱な第四系・鶴川層内での坑跡コントロールや水平に近い掘削のため、掘削障害のリスクあり。
圧入後CO ₂ の移動(シミュレーション結果)	
● (3年圧入後)気相CO ₂ の拡がりは圧入井近傍で400m×600m程度、溶解CO ₂ は400m×600m程度(ベースケース)。 ● 20年程度で、気相CO ₂ の拡がりに変化は見られなくなる。 ● 1,000年後までは、周辺部での地層水へのCO ₂ の溶解が進み、CO ₂ 飽和率減少が確認される。	

3.2 貯留対象層周辺を取巻く環境等の評価

3.2.1 活断層分布および地震活動

(1) テクトニクス概要

図 3.2-1 に苫小牧周辺のテクトニクスを示す地質概念図を示す。圧入想定域は、北海道の石狩一日高地域に属する（図 3.2-1 左下の地質図）。地質構造的には、西方に向かって前進する北北西－南南東方向の褶曲・衝上断層帯で特徴づけられる（図 3.2-1 上段の図）。同褶曲・衝上断層帯は、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成された日高衝突帯の西側の前縁部に形成されている¹⁾。

広域の地質構造的な特徴は、以下のとおり要約できる（図 3.2-1）。

- ・西方に向かって前進する複数の褶曲・衝上断層帯が発達する。これらは、東北日本弧と千島弧の衝突によって形成されたもので、中新世に始まったものである。
- ・褶曲・衝上断層帯にはいくつかの断層が認められ、地表に現れている最も西側の断層は馬追断層で代表される断層群である。
- ・既往の弾性波探査データから馬追断層の西側にはいくつかの伏在衝上断層が推定される。
- ・馬追断層およびその西側の伏在衝上断層は、南北に延びる活断層である「石狩低地東縁断層帯」を形成している。

【参考文献】

- 1) 伊藤他（1999），日高衝突帯におけるデラミネーション-ウェッジ構造．月間地球，v. 21, n. 3, pp. 130-136.

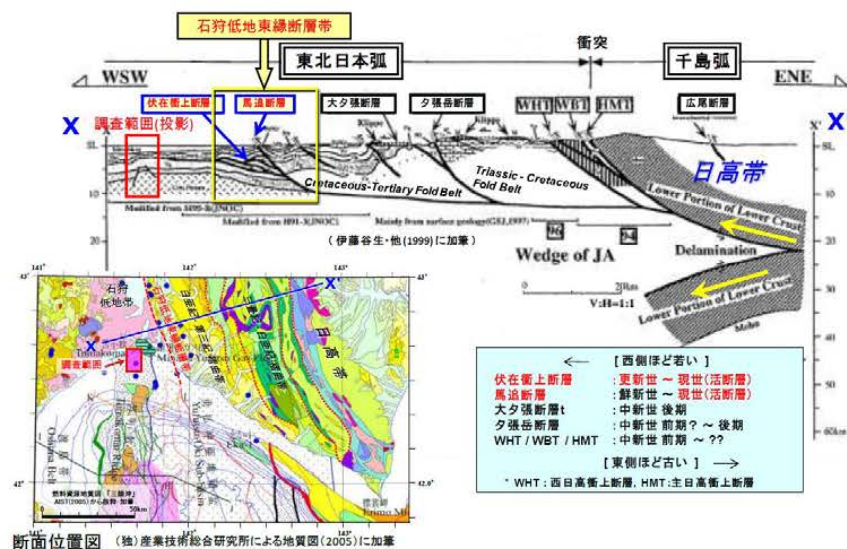


図 3.2-1 苫小牧周辺のテクトニクス概要

(2) 北海道周辺の地殻応力分布

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」においては、CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項として、CO₂圧入地点付近における過去の地震活動が挙げられている。過去の地震活動の検討の一環としては、圧入地点周辺の地殻応力状態や歪みの蓄積状況を事前に把握する必要があることから、国土地理院によるGPS観測点網(GEONET)による年間平均変位速度ベクトルと、地殻応力データベースであるWorld Stress Map²⁾(WSM)を利用して応力分布について調査した。

図 3.2-2 に、WSMによる応力データ分布および札幌観測点を固定した変位速度図を示す。これらの図に現れた応力分布を反映すると考えられる特徴を列記する。

北海道南東部-日高山脈南部は、太平洋プレートの沈み込みによる千島弧の東北日本弧への衝突が生じている地域である。地殻変位速度はこの衝突と整合的な西から西北西への変位が顕著であり、南東ほどその変位速度が大きく、年間20mm以上に達している。応力データ分布図には陸域のデータが少ないが日高山脈南端付近に逆断層型の東西圧縮を示すデータが存在し、地動変位速度ベクトルと調和的である。

石狩低地帯内に存在する札幌観測点を固定点とした場合、北海道北部地域から苫小牧-室蘭に至る地域は相対的な変位は小さい。

【参考文献】

- 2) World Stress Map (URL <http://dc-app3-14.gfz-potsdam.de/>)

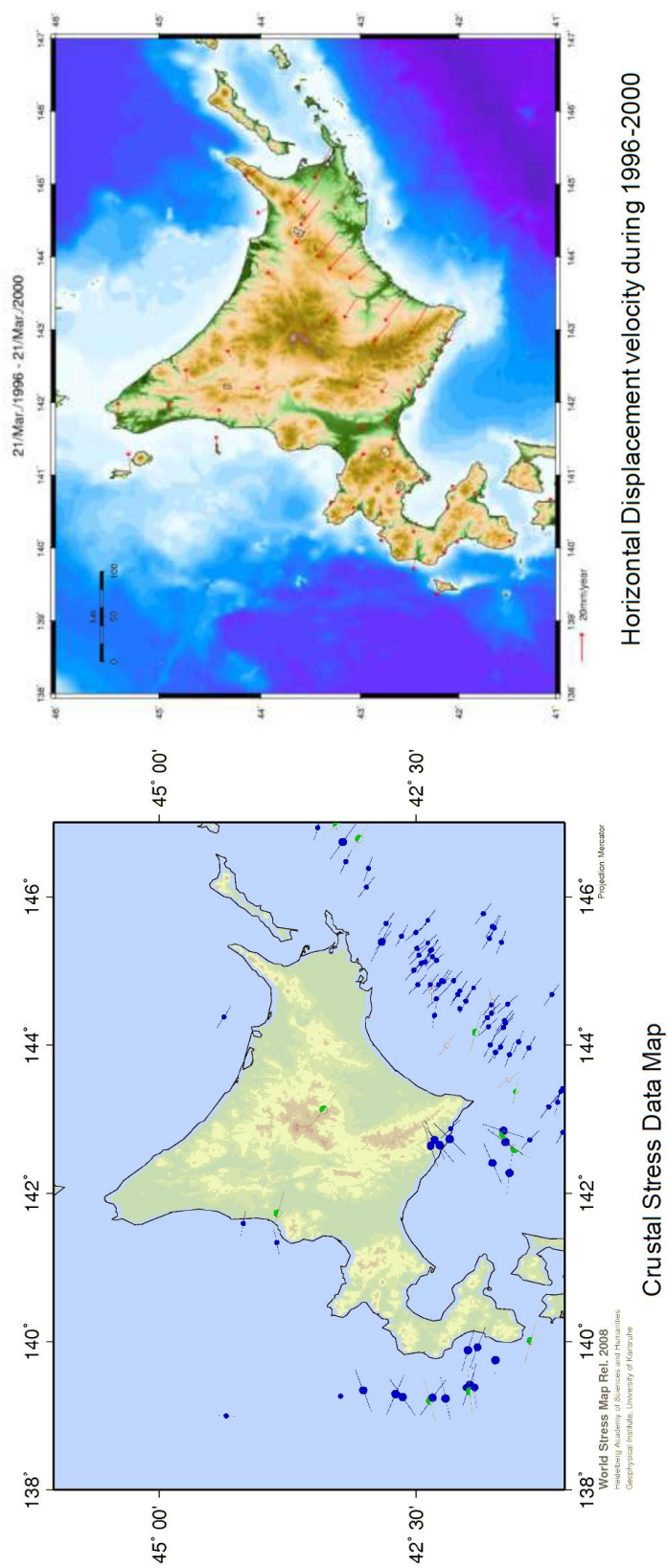


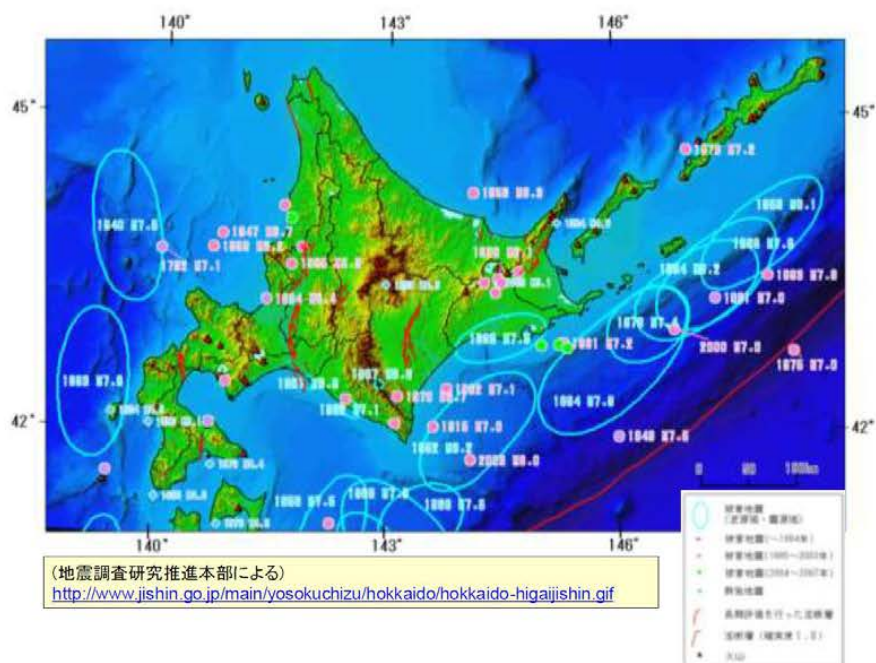
図 3.2-2 北海道地域の地殻応力データ分布図 (左) および水平変位速度分布図 (右)

(3) 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」においては、CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項として、CO₂圧入地点付近における過去の地震活動が挙げられている。そこで、過去や現在の地震活動状況を調べることで、圧入地点周辺の断層運動の履歴や地殻の活動度を知ることを目的として調査を行った。

北海道周辺には、深部（100km 以深）の海溝型（プレート境界型）と浅部（20-40km 以浅）の内陸地震の2タイプの地震活動があり、千島海溝-日本海溝に沿って、津波を伴うマグニチュード（M）8クラスの海溝型巨大地震が繰り返し発生している（図3.2-3）。北海道では、古文書に記録された古い地震は少ないが、津波堆積物の調査から、400-500年周期で巨大津波を経験してきたことが分かっている。

苫小牧周辺における現在の地震活動を図3.2-4に示す。震源分布断面図からは、地下深部（100km 以深）の海溝型（プレート境界型）と浅部（20-40km 以浅）の内陸地震の2タイプの地震活動があることが分かる。平面分布図から、圧入想定地点周辺の地震活動度は、他の地域の活動度とほとんど差異はないことがわかる。苫小牧市南西側には、樽前山などの活火山があり、群発地震が発生することがある。ほとんどの場合 M5 以下であるが、まれに M5 より大きくなり、局所的に被害が生じることがある。群発地震の活動期間は、多くは1〜3カ月の比較的短い時間で収まるが、1年を越えた例も知られている。



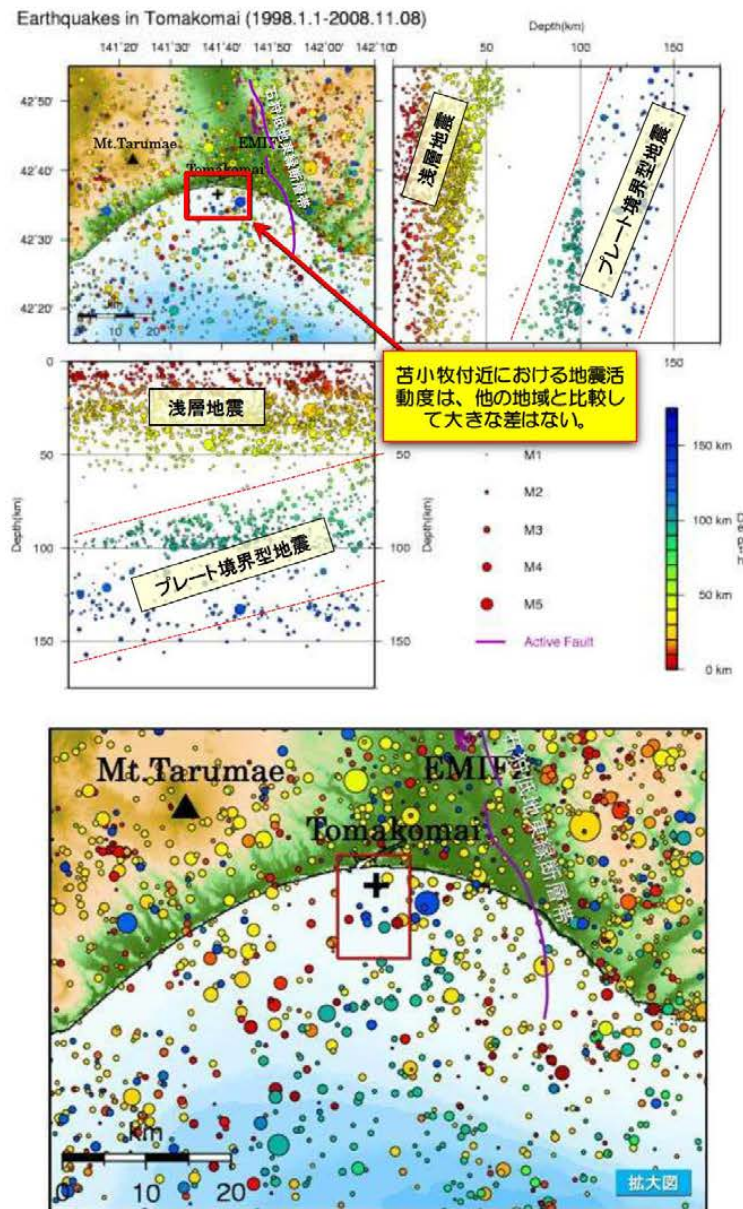


図 3. 2-4 苫小牧周辺の最近の地震活動（1998 年～2008 年、 $M>1$ ）
（赤枠内は調査範囲）

(4) 苫小牧周辺の活断層

ここでは、活断層とは、第四紀後期更新世（約13万年前）以降現在まで活動的である断層、と定義する。

北海道地方の活断層のほとんどは逆断層であり、北海道の中央部がほぼ東西方向に圧縮されていることを示している。地殻変動観測からおおむね西北西－東南東方向の圧縮場にあることがわかる（図3.2-2）。

苫小牧周辺の活断層としては、石狩平野の東縁に沿って南北方向に走っている「石狩低地東縁断層帯」がある（図3.2-1）。図3.2-5は、地震調査研究推進本部による「石狩低地東縁断層帯」の分布図である。平成22年8月に改訂されて追加された南部延長部も含まれている。図中の南部延長部は、断層そのものではなく断層活動を伴う変形を表す背斜構造軸として表現されている。震度予測シミュレーションで用いられている断層は、背斜軸の10～20km東方に想定されており、想定圧入地点からは20km以上あり、十分離れていると言える。



図3.2-5 石狩低地東縁断層帯

(5) 三次元弾性波探査断面図に見られる断層

本地域で実施された三次元弾性波探査の断面図には、断層と判断される不連続面が確認されている。図3.2-6はその一例で、滝ノ上層の想定貯留地点を横切る Line IL-145 の東西断面図である。断面図上のほぼ中央に認められる断層は、ほぼ南北方向の走向で、滝ノ

上層から平取+軽舞層までを切っている。本断層は萌別層を切っておらず、活断層ではないと推定する。本断層は3Dデータの解析による振老層の分布形状から中新世の中期以前の引張応力場で形成された正断層と推定する。その後、荷菜層の堆積時に西側が下がるような活動があったと考えられ、その後、萌別層堆積時以降は活動を停止した。そのため、現在の圧縮応力場では再活動の可能性は低いと判断する。

また、地層水の塩分濃度分布から求めた水理地質構造から、本断層は不透水性と推定され、圧力の伝播と地層水の動きが断層にあたえる影響は小さいと判断する。

以上により、本断層は滝ノ上層T1部層へのCO₂の圧入に対しては安定していると判断する。

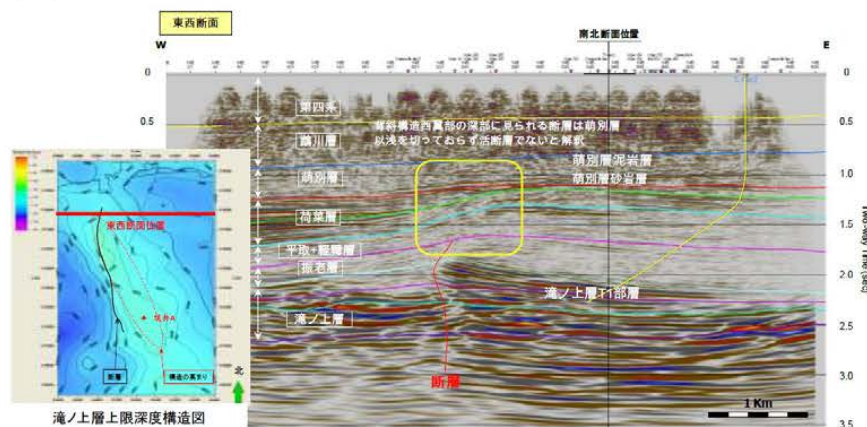


図 3.2-6 三次元弾性波探査断面図上でみられる断層例

(6) 苫小牧地点で予想される地震

苫小牧市地域防災計画においては、苫小牧沖の地震（プレート内の地震、M7.8、1974年苫小牧沖地震の震源）、馬追断層の地震（内陸地震、M6.8）、苫小牧直下の地震（内陸地震、M6.8、市街地直下の震源）を想定し、それらの震度の予測をしている。最も強い揺れの地震が予想されているのは苫小牧直下を震源とするもので、実証試験の調査地域の沿岸域（陸上）では震度5強から6弱が想定されている（図3.2-7）。

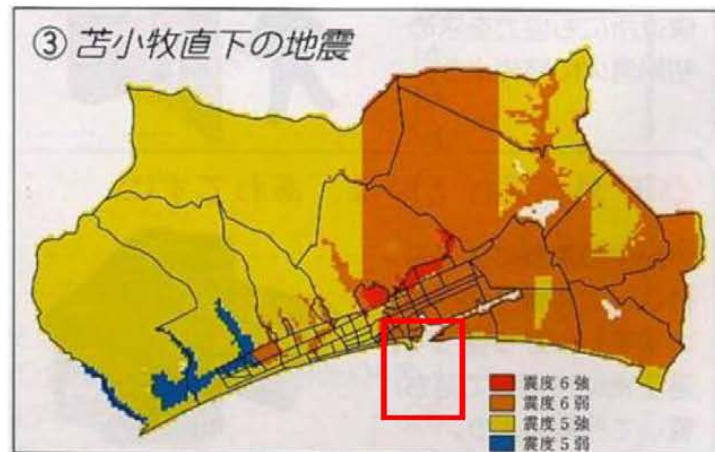


図 3.2-7 苫小牧直下を震源とするの地震の震度予測（苫小牧市地域防災計画）
（赤枠内は調査範囲）

馬追断層を含む「石狩低地東縁断層帯（南部）」（図 3.2-5）については、地震調査研究推進本部によれば、54km 以上が一つの区間として一度に活動した場合、その地震の規模は、M7.7 程度以上になると推定されている。図 3.2-8 は、この地震が発生した場合に予測される断層帯の周辺地域の震度分布を示しており、苫小牧市から勇払平野にかけては震度 6 強（赤色）が、実証試験の調査地域の沿岸域（陸上）では震度 6 弱（オレンジ色）が予測されている。

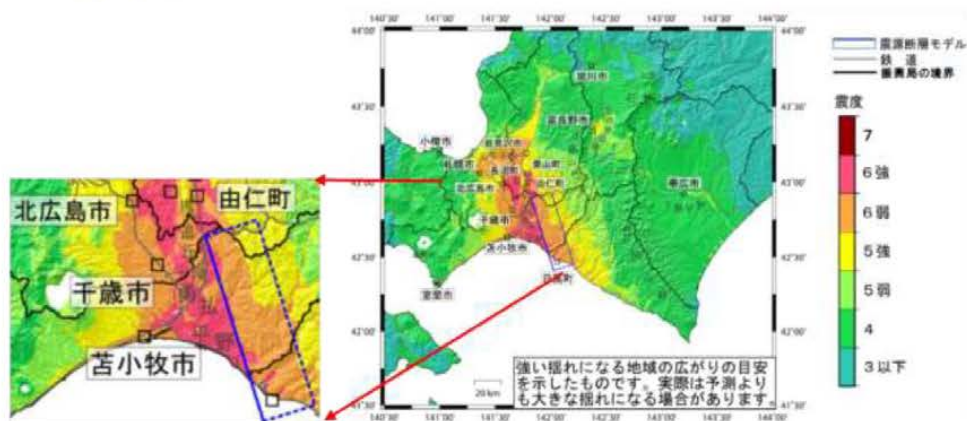


図 3.2-8 石狩低地東縁断層帯南部の地震による予測震度分布
（地震調査研究推進本部、2010 年 8 月）

3.2.2 CO₂漏出の可能性検討

(1) CO₂漏出要因の洗い出し

貯留層からCO₂が漏出する要因として、IPCC特別報告書において示されている潜在的な漏洩経路は下記の通り分類されている（図3.2-9 参照）。

- (A) CO₂のガス圧が遮蔽層の毛管圧を超えて移動
- (B) 断層を通じてCO₂が移動
- (C) キャップロックの局所的な不連続部分を通じた移動
- (D) CO₂貯留層圧の増加および断層の浸透率の増加によって生じる移動
- (E) プラグの状態が完全でない廃坑井を通じた移動
- (F) 地下水に溶解したCO₂が貯留層の外に移動
- (G) 地下水に溶解したCO₂が傾斜した地層を通じて地表に移動

Potential leakage routes and remediation techniques for CO₂ injected into saline formations

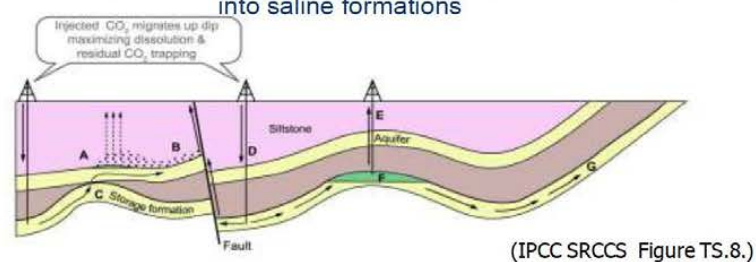


図3.2-9 IPCC特別報告書による潜在的な漏洩経路

苫小牧地点における貯留層総合評価の検討結果により、貯留後のCO₂が貯留対象層から漏出する要因の可能性として、以下の漏洩経路が想定される。

- 1) 遮蔽層の毛管圧を超えて移動
- 2) 断層を通じた移動
- 3) 廃坑井を通じた移動
- 4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

(2) CO₂漏出要因に関する検討のまとめ

苫小牧地点における上記の想定される漏洩経路（1）～（4）について検討した結果のまとめは、以下の通りである。

1) 遮蔽層の毛管圧を超えて移動

滝ノ上層T1部層および萌別層砂岩層の圧入圧力は、それらの遮蔽層の毛管圧（スレシヨルド圧力）を超えることはなく、CO₂は遮蔽層には浸透しない（滝ノ上層T1部層では、スレシヨルド圧力が十分に高い。萌別層砂岩層では、滝ノ上層T1部層に比べればスレシヨルド圧力が低いものの、シミュレーションの結果、CO₂は遮蔽層に浸透せず、良好な遮蔽性能が期待される）。

2) 断層を通じた移動

シミュレーションによるCO₂長期挙動予測の結果、圧入後200年程度でCO₂の拡がりに変化は見られなくなり、1,000年を経てもCO₂は断層に到達しないことから、断層はCO₂の漏出要因にならないと考える。

3) 廃坑井を通じた移動

シミュレーションによるCO₂長期挙動予測の結果、圧入後200年程度でCO₂の拡がりに変化は見られなくなり、1,000年を経てもCO₂は廃坑井に到達しないことから、廃坑井はCO₂の漏出要因にならないと考える。

4) 圧入井等の設置予定の構造物に沿った移動

圧入井等の構造物の設計・建設では、CO₂が接触する鋼材やセメント等を耐CO₂仕様にする等の対策を施すことで、これら構造物に起因したCO₂の移動を防止する。

以上から、圧入井等の構造物を耐CO₂仕様により、基本的には、CO₂の漏出は生じないものとする。

3.3 「CCS実証事業の安全な実施にあたって」への対応

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」において、「CO₂圧入開始前までに取得するデータ」で挙げられているデータについての確認状況についてまとめた。表 3.3-1 に滝ノ上層T1部層の確認状況を、表 3.3.-2 に萌別層砂岩層の確認状況を示す。

表 3.3-1 「CO₂圧入開始前までに取得するデータ」における淹ノ上層 T 1 部層のデータ確認状況

取得するデータ	取得方法	確認状況
検層により得られる地層の各種データ (岩相、流体飽和率等の把握、浸透性の推定)	物理検層	確認済み
層序・岩相	泥水検層	確認済み
貯留層およびキャップブロックを含む岩石鉱物組成	コア分析 掘り屑分析	確認済み
貯留層およびキャップブロックを含む上位層の孔隙率	物理検層 コア試験	確認済み
貯留層およびキャップブロックを含む上位層の浸透率	コア試験	確認済み
貯留層の毛管圧	コア試験	確認済み
キャップブロックのスレシヨルド圧力	コア試験	確認済み
貯留層破壊圧	コア試験 リークオフテスト	確認済み
キャップブロックの破壊圧	コア試験 リークオフテスト	確認済み
温度・圧力	掘削時の測定、検層、 温度・圧力測定(温度勾配、圧力勾配を含む)	確認済み
地層水の化学分析	揚水	圧入井掘削時に採取

表 3. 3-2 「CO₂圧入開始前までに取得するデータ」における萌別層砂岩層のデータ確認状況

取得するデータ	取得方法	確認状況
検層により得られる地層の各種データ (岩相、流体飽和率等の把握、浸透性の推定)	物理検層	確認済み
層序・岩相	泥水検層	確認済み
貯留層およびキャップブロックを含む岩石鉱物組成	コア分析 掘り屑分析	確認済み
貯留層およびキャップブロックを含む上位層の孔隙率	物理検層 コア試験	確認済み
貯留層およびキャップブロックを含む上位層の浸透率	コア試験	確認済み
貯留層の毛管圧	コア試験	確認済み
キャップブロックのスレシヨルド圧力	コア試験	確認済み
貯留層破壊圧	コア試験 リークオフテスト	確認済み
キャップブロックの破壊圧	コア試験 リークオフテスト	確認済み
温度・圧力	掘削時の測定、検層、 温度・圧力測定(温度勾配、圧力勾配を含む)	確認済み
地層水の化学分析	揚水	圧入井掘削時に採取

用語集

五十音	用語	説明
ア行	アクティブ・ブロック	シミュレーションでのグリッドモデルにおいて属性値の入力されたブロック(セル)数。
	圧縮率	本書では、貯留層岩石にかかる圧力と体積の関係を表す物理量。
	圧入能カテスト	流体を圧入することで、圧力および圧入量の時間変化を調査して、貯留層の圧入性能を評価するためのテスト
	アンブリチュード値	アンブリチュードとは振幅のこと。弾性波探査データはさまざまな波から構成されるが、振幅とは波の強さを表す。
	エクステンディッド・リークオフテスト (Extended Leak-off Test)	リークオフテストと同様に地層強度を測定する手法の一つ。リークオフテストとの違いは地層内にフラクチャァーが成長する圧力まで加圧することで、地層破壊圧をはじめ最小主応力まで求めることが出来る。
	遠心分離法	水をしみ込ませた岩石試料を遠心分離器にかけて、回転数を上げながら回転数(遠心力)に応じて試料から排出される水の量を測定することにより、毛細管圧力を測定する手法。
	音波検層	坑井内において音波を発信し、坑壁近傍の地層の一定区間を伝播する音波の到達時間を連続測定し、地層中の音波速度情報を取得する物理検層種目。
	オンラップ	堆積物が高まりに向かって堆積する時の様式。
カ行	海進期堆積体(TST)	シーケンス層序学に基づいて堆積物を解析する際に用いる堆積物の名称の1つ。海水準が上昇する過程で海底で堆積する堆積物。 TSTは、Transgressive Systems Tractの略。
	核磁気共鳴検層	医療用のMRIと同じ原理で、岩石の孔隙率と浸透率とを測定する物理検層種目。
	火山岩	地表(海底を含む)または地下浅所においてマグマが急冷することによって生成された岩石。SiO ₂ の含有率により、高い方から順に流紋岩、デイサイト、安山岩、および玄武岩に分類される。火山岩が海底で噴出すると、一部の鉱物が化学反応を起こして変質することがある。苫小牧CCS-1の淹ノ上層T1部層は、コア試料分析の結果、主に安山岩～玄武岩からなり変質は進んでいないことがわかった。
	火山砕屑物	火山の噴火で火口から直接噴出された岩石が壊れてできた破片や粒子の堆積したもの。
	カッティングス	坑井掘削中に生ずる掘り屑。
	岩相	地層の特徴。
	ガンマ線検層	岩石に含まれるカリウム等の放射性同位体が発するガンマ線量を測定する物理検層種目。
	気相CO ₂	貯留層の温度圧力によっては、CO ₂ は気体と液体の特性をあわせ持つような状態になるが、本書では地層水に溶解したCO ₂ と区別して、気相CO ₂ と呼ぶ。
	基礎物理探査	国内の石油・天然ガス資源の開発を目的に、昭和30年から国によって実施されている全国規模の弾性波探査や重力・地磁気探査などの地球物理学的調査。ちなみに調査掘削は基礎試錐と呼ばれている。
	基底	ある地層の下限。
	基盤岩	本書では、石油や天然ガス鉱床を形成しうる地層の最下部より下位の地層。
	逆断層	断層に沿って上の地層が下の地層の上にのし上がっている断層。横から強く圧縮されたときに生ずる。
	凝灰角礫岩	熔岩由来の角礫岩片を多量に含む凝灰岩。
	凝灰岩	火山灰や軽石が固結した岩石。
	強反射	弾性波が地下から戻ってくる時の波の振幅が強い状況。
	空気浸透率	測定対象試料に空気・ヘリウム等の気体を圧入して測定した浸透率。
	具現モデル	地球統計学的手法により表現された地下のモデル。
	クラスター解析	データを分類する手法の一つ。類似した特性によって物事をクラスター(集落)に分ける統計的分析手法。
	グリッドセル	シミュレーションにおいて計算に用いられる地層を模した最小の単位。
	グリッドモデル	CO ₂ 挙動予測シミュレーションを行うためのグリッドセルからなるモデル。
	珪藻化石	単細胞の藻類の1種の化石。
	コア	井戸を用いて採取される円筒形の地層試料。
	高海水準期堆積体(HST)	海水準が高い時期に堆積した堆積物。堆積する場所が順次海側へ前進するという特徴を有する。 HSTは、Highstand Systems Tractの略。
	坑径検層	坑井の直径を測定する検層種目。
	孔隙分布	岩石中の孔隙の半径と容積とを頻度分布で表したもの。
	孔隙率	岩石の“かさ容積”に対する孔隙の容積の割合のこと。％で表すこともある。
	合成弾性波記録	物理検層データ(音波速度と見かけ密度)から計算される反射係数から合成した弾性波反射記録。坑井位置での弾性波探査記録と比較することによりキャリブレーションとして用いられる。

五十音	用語	説明
カ行	構造運動	褶曲を形成したり断層を変位させる作用。テクトニクスともいう。
	構造場	本書では、過去において火山岩が形成されたり堆積物が堆積する時の地質構造。
	構造モデル	CO ₂ 挙動予測シミュレーションにおいて、種々のパラメータを与える前の枠組みのみのモデル。
	坑底圧力	本書では、貯留層上限深度での坑内圧力をいう。
	古第三系	およそ6,500万年前から2,300万年前の古第三紀と呼ばれる地質時代にできた地層。
	コントロールポイント	本書では、弾性波探査データを地質学的に解析する際の起点をいう。たとえば、重力異常から地下構造を推定する場合、坑井での地層深度データを坑井位置における既知情報としてモデル作成時に利用する。
サ行	最大残留ガス飽和率	残留CO ₂ トラッピングにより移動できなくなるCO ₂ の最大限の容積の、全孔隙容積に対する比。
	再堆積相	一度堆積した地層が、水流等により別の場所に流されて堆積した地層。
	差分法	微分方程式を解く際の数値解析方法の1つ。
	残差圧力法	コア試料を水で充填し、気体にスレショルド圧力よりも大きい圧力をかけてブリークスルーさせた後でスレショルド圧力を測定する方法。
	三次元弾性波探査	面的に発振点、受振点を配置し、測定を空間的に密に行うことで、三次元的な地下構造を把握するための反射法弾性波探査。発振点で発生させた弾性波が、地下の地層境界で反射して受振点に戻ってきた時の振幅を連続して測定する。このデータを用いて作成した地下構造図は、弾性波が反射して戻ってくるまでの往復走時(秒)で表示され、時間構造と呼ばれる。これに各地層間の弾性波の伝播速度をかけ合わせることで深度構造が求まる。この一連の作業を時間構造から深度構造へ変換という。
	産出	本書では、坑井を用いて圧入テストにおいて、貯留層から流体が坑内に入ることを行う。
	産出能力テスト	坑口圧力を開放して坑内流体や地層流体を産出させるテスト。圧力および産出量の時間変化を調査して、貯留層性能の評価に加え地層流体が採取できることもある。
	残留ガス飽和率	残留CO ₂ トラッピングにより移動できなくなるCO ₂ の容積の、全孔隙容積に対する比。
	残留CO ₂ トラッピング	貯留層に貯留されたCO ₂ は、圧入中の圧力が貯留層の毛細管圧を超えた場所では微細な孔隙中に入り込み、その後、その場所から移動できなくなる。このような毛細管圧による固定されるメカニズム。
	時間構造図	弾性波データによる解析結果の1つで、地下の等深度線図の1つ。地表からの深度は弾性波が伝播する往復走時で表される。
	シーケンス層序学	地層がいつ、どこで、どのような堆積過程で形成されたのかを目的とした地質解析の1手法。
	自然電位検層	掘削泥水と地層水の塩分濃度差により生じる、岩石の地下状態での電位差を測定する物理検層種目。
	自噴	本書では、坑井を通じて地下水などが自然に地表まで流出することをいう。
	シミュレーション	模型あるいは数値モデルによる模擬試験のこと。本書では、地下の状況をモデル化して(計算式プログラム)、圧入したCO ₂ の挙動をコンピューターにより予測計算することを指す。
	斜面(Slope)	本書では、陸棚から深海へ向かって傾斜した地形での主に泥岩からなる堆積物のこと。
	褶曲	地層が横からの圧縮力を受けて、波状に押し曲げられている構造のこと。
	衝上断層	緩傾斜の逆断層を介して、一方の地層が他方の地層の上にのし上げた断層。
	シルト岩	主として砂と粘土の中間のサイズの粒子(1/16～1/265mm)によって構成された堆積岩。
	新第三系	およそ2,300万年前から260万年前の新第三紀と呼ばれる地質時代にできた地層。
	浸透率	岩石などの中を流れる流体の通りやすさを表す物性値の1つ。単位はD(ダルシー)。絶対浸透率ともいう。
	深度構造	弾性波探査データ解析で求めた時間構造を深度に変換したもの。
	水平浸透率	砂岩層は一般には層状に堆積しており、ある範囲では横方向には比較的均質であるが、縦方向には不均質となることから、浸透率も横方向と縦方向とで異なるのが一般的である。そこで横方向の浸透率を水平浸透率、縦方向の浸透率を垂直浸透率という。

五十音 サ行	用語	説明
	水理地質	地下水を含む地層の岩相変化や連続性、透水性、貯留性などの地層特性。
	スケルトン・アトリビュート	弾性波探査データは波から構成されていることから、波の形状の特徴を数値化したデータ。
	スレショルド圧力	本書では水が充填された岩石の孔隙に、気体が浸入するために必要な最小の圧力。
	成層構造	本書では、層状に整然と積み重なっている様をいう。
	世界測地系WGS84のUTM54系	世界測地系とは国際間で共通に用いる地球上の座標系のことであり、WGS84とは地球を近似する準楕円体の一種である。WGS84はGPSで用いられている。UTM54系のUTMとは、球面の座標を地図などの使いやすい平面の座標に直す投影法の一つである、ユニバーサル横メルカトル(Universal Transverse Mercator)図法を示す。平面の地図上に直す場合、歪みが一番小さくなるように、場所場所によって投影する基準面を変化させる必要がある。54系は関東～北海道まで使われている。
	層準	地層の中のある特定の時代を示す面、あるいはある厚さをもったある特定の地層の区間を指す。
	相対浸透率	砂岩に2種類以上の流体が共存して流れている時、各流体のその時の浸透率の絶対浸透率に対する比のこと。
	属性	グリッドセルに与える各種のパラメータのこと。
	属性モデル	グリッドモデルに、孔隙率、浸透率等の各種パラメータ(属性値)が与えられたモデル。
	速度構造モデル	地下での弾性波探査の伝播速度分布をモデル化したもの。
タ行	帯水層	水を通しやすい地層で、孔隙や割れ目が地下水で飽和されたもののこと。
	堆積学	地質学の1分野で、堆積物が形成される機構を研究し、堆積物の分布や性質などを調べる学問。
	堆積環境	堆積物が堆積する場のいろいろな条件(地理的、物理的、化学的、生物学的など)の総体。
	堆積相	堆積物の分類名称のこと。
	第四系	およそ260万年前から現在までの第四紀とよばれる地質時代にできた地層のこと。
	ダウンラップ	堆積物が低い場所に向かって堆積する時の様式のこと。
	卓越層	複数の岩石から形成されている地層で、特にある岩石が卓越する場合に用いる呼称。
	段階昇圧法	コア試料を水で充填した後、気体にスレショルド圧力よりも小さい圧力から徐々に圧力をかけて、スレショルド圧力を測定する手法のこと。
	弾性波探査	地表や海中で振動(弾性波)を発生させ、地下の地層境界ではね返ってくる弾性波を計測することにより、地下の地質構造を知る手法のこと。反射法(弾性波)探査とも呼ばれる。
	弾性波探査シミュレーション	本書では、想定される帯水層中でのCO ₂ 分布が、弾性波探査によりどのようなデータ(弾性波速度や振幅値)が得られるのかを予測すること。
	弾性波データ	弾性波探査による取得されたデータのこと。測定点における反射波の振幅が時系列(往復走時)で記録されたものである。
	地温勾配	地層の温度は深度とともに増加するが、その時の上昇率のこと。
	地球統計学的手法	地球科学データを処理するための統計学的手法のこと。もともとは鉱床の位置を高精度で推定するために開発された手法。不確実性を客観的に表すために用いる。
	地質構造	地層の形態。
	地質層序	地層の積み重なり方。
	地層圧力	地層の孔隙内に存在する流体の圧力。
	地層水	地層が堆積した当時の海水または陸水が、堆積物中の孔隙内に閉じ込められたもの。
	地動変位速度ベクトル	変位速度ベクトルに同じ。
	中新世	およそ2,300万年前から500万年前の地質時代。
	中性子孔隙率検層	岩石の物理量の1つである孔隙率を中性子線を用いて測定する物理検層種目。
	チューピング	坑井で地下の石油やガスを地上まで導く、あるいはCO ₂ を地下に圧入するために、ケーシング内に設置される小口径のパイプ。
	貯留層モデル	CO ₂ 挙動予測シミュレーションにおいて、種々のパラメータを与えた後のモデルのこと。
	泥岩	主として粘土サイズの粒子(1/256mm以下)によって構成された堆積岩。
	泥水比重	坑井掘削時に用いる泥水の水に対する比重。

五十音	用語	説明
タ行	ディップメータ検層	地層の傾斜を測定する物理検層種目。
	テクニクス	現在の地質構造を形成した枠組みのこと。例えば、海溝や山脈、褶曲や大規模断層の位置など示し、応力場の推定の参考にする。
	等価泥水比重	坑井の坑底にかかる圧力を泥水比重に換算した値。
ナ行	二次元弾性波探査	直線状に発振点、受振点を配置し、測定を行い、測線に沿う地下構造を把握するための反射法弾性波探査。
ハ行	背斜	褶曲の1種で上に凸の形態のもの。
	背斜構造軸	断面図上で背斜構造の最も高い点が、水平面上で形成する線。
	バーフォレーション	油・ガスを地層から生産するため、またはCO ₂ を地層内に圧入するために、火薬を使用して坑壁を保護しているケーシングとセメントの一部区間に穿孔し、地層まで穴を開け坑内と導通させる作業。
	反射面	弾性波探査において、地表で発生させ地下に伝播した弾性波が反射する地層境界面。
	半深海	海洋環境の深度による区分の1つで、深度200～4,000mの間を指し、その内深度200～500mを上部半深海、深度500～2,500mを中部半深海という。
	微化石	同定に顕微鏡が必要な微小な化石の総称。坑井掘削においては有孔虫や珪藻、花粉化石などの分析がなされることが多い。
	ヒステリシス	本書では、最初は水で満たされた貯留層にCO ₂ を圧入した後でCO ₂ を抜き出しても、毛細管現象により貯留層中にCO ₂ が残ってしまうことから、元の状態には戻らない現象をいう。
	比抵抗画像検層	坑内の坑壁のイメージを比抵抗を用いて測定する物理検層種目。
	比抵抗検層	岩石の物理量の1つで、単位体積当たりの抵抗値を測定する物理検層種目。
	ビルドアップ	本書では、坑井を用いて地層の温度を測定する際に、坑井内を泥水などの流体を循環させることによって低下した地層温度が元の状態に戻ることをいう。
	ファンデルタ	河川から延びる臨海部に扇状広がった堆積体のこと。海岸や湖岸から沖合にむかって急激に深くなるような海底や湖底に、河川から大量の粗粒（礫質）堆積物が供給される場合に形成される。
	封圧	本書では、コア試料を用いて孔隙率や浸透率を測定する際に、地下状態を模して試料全体に均等に加える圧力のことをいう。
	伏在衝上断層	衝上断層の先端が地表に出ておらず、地下で止まった状態のもの。
	不整合	地層が堆積するときに時間の大きな断続があり、下の地層を切るようにして、上に地層が堆積しているような地層の重なり。
	物理検層	坑井掘削時に、各種のセンサーや測定器を坑内に降下させ、種々の物理量を測定する調査方法。
	物理的トラッピング	貯留層に貯留されたCO ₂ は、浮力により貯留層内を上方へと移動するが、上方の遮蔽層のところではそれ以上上方には移動できなくなる。地層の形態によってはそれ以上移動できない状態となるが、このメカニズムを物理的トラッピングという。
	不動水飽和率	岩石は水に親和性を示すことから、毛細管現象により小さな径の孔隙に入っている水はある程度大きな圧力をかけないと取り出すことが出来ない。この時の水の容積の全孔隙容積に対する割合。
	ブレイクスルー	コア試料を水で充填し、一方の端から気体に圧力をかけることにより、他方の端へ気体が到達する時の状態。
	閉合圧力	エクステンディッド・リークオフテストにより坑内に圧力をかけて生じたフラクチャーが閉合する圧力（最少主応力に一致）。
	変位速度ベクトル	地殻の水平変動の速度の大きさと方向を、ある点を固定して相対的に表したものの。
	ベントナイト泥水	坑井掘削時に用いる泥水の1種でベントナイトと呼ばれる粘土を用いるもの。
	飽和率	地層の孔隙を占める流体の容積と全孔隙容積の比率。
マ行	マール	炭酸塩鉱物成分を含む泥岩。
	見かけ密度検層	岩石の物理量の1つである密度を測定する物理検層種目。
	水浸透率	測定対象試料に水を圧入して測定した浸透率。
	毛管圧力	毛細管圧力。毛細管現象によって生ずる張力。
ヤ行	有孔虫	主に石灰質の殻と網状仮足をもつ原生生物の一種。地層中に含まれる殻の化石により堆積時代や堆積環境を知ることができる。沖縄地方の星の砂は有孔虫の殻。
	溶解トラッピング	貯留層に貯留されたCO ₂ が、地層中にもともと存在する地層水に溶解し地層に固定されるメカニズム。
	翼部	地層が横からの圧縮力を受けて、波状に押し曲げられた構造（褶曲）の、地層が傾いている部分。

五十音	用語	説明
ラ行	リークオフテスト	坑井掘削時に行う地下状態の地層強度を測定する1手法のこと。坑内に圧力をかけて地層に微小な割れ目が生じる(リークオフする)圧力を測定する。
	陸棚(Shelf)	海岸から水深約200メートルまでの傾斜の緩やかな海底。
	臨界ガス飽和率	孔隙に気相を含んだ2相が共存する場合、気相はある限界値より低いと、全く流れない。その時の気相の飽和率をいう。

五十音	用語	説明
英数	AI	音響インピーダンス(Acoustic Impedance)。地層密度と弾性波伝播速度との積に等しい。地層の物性を示すパラメータの一つで、一般的に大きい値ほど緻密で硬い岩石を示す。
	CMR	物理検層の一種で、Schlumberger社により開発されたCombinable Magnetic Resonance検層。核磁気共鳴の原理を用いて地層の孔隙率や浸透率を求める際に用いる。
	CO ₂ 飽和率	貯留されたCO ₂ のうち地層水に溶解していないものの全孔隙容積に対する比。
	CO ₂ 挙動予測シミュレーション	本書では、貯留層にCO ₂ を圧入した際の温度・圧力や貯留層内での広がりを予測するシミュレーションをいう。
	FMI	物理検層の一種で、Schlumberger社により開発されたFullbore Formation Micro Imager検層。比抵抗を用いて坑内の地層の画像を取得する際に用いる。
	Follow Base	CO ₂ 挙動予測シミュレーションにおいて、グリッドセルを構築するための手法の1つで、ある地層の下面に平行にセルを分割すること。
	Follow Top	CO ₂ 挙動予測シミュレーションにおいて、グリッドセルを構築するための手法の1つで、ある地層の上面に平行にセルを分割すること。
	K-means法	SOMでグループ分けしたデータの境界を決定するための統計学的な手法。
	Opacity Curve	本書では、3次元データの振幅値表示などで、表示領域を限定(部分的に透明化)する際のカーブ。堆積相解析の際に、堆積体の抜き出しに使われる。
	RCBL	坑井周りのセメンチングの膠着の度合いを放射状の8方向について測定する検層。Radial Cementbond loggingの略。
	SOM	Self Organizing Mapsの略称で自己組織化写像とも呼ばれる。多数のデータのグループ分けに用いられる。
	VSP	坑井内に受振機器を設置して、地表で発生させた弾性波を測定し、地質構造を知る手法。Vertical Seismic Profilingの略で垂直弾性波プロファイリングとも呼ばれる。地表での弾性波探査よりも分解能の高い記録が得られるほか、深度と伝播時間を直接計れるため深度変換用の速度を正確に求められる。
	XPT	探針を坑壁に押し当て、少量の流体を地層から引き出して、地層の圧力と浸透率を求める検層。